



João Rui Franco Duarte

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Metodologia para a definição dos calços
de regulação das folgas nos sistemas
mecânicos – aplicação na produção em
série de um produto da indústria
automóvel**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor António José Freire Mourão,
Professor Associado, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Professor Doutor Manuel Flores Romão de
Azevedo Gonçalves Coelho

Arguente: Professor Doutor Alberto José Antunes
Marques Martinho

Vogal: Professor Doutor António José Freire
Mourão



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2012

Metodologia para a definição dos calços de regulação das folgas nos sistemas mecânicos - aplicação na produção em série de um produto da indústria automóvel

Nota: Esta dissertação não foi escrita ao abrigo do novo acordo ortográfico de 1990.

Copyright @ João Rui Franco Duarte, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

João Rui Franco Duarte

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Metodologia para a definição dos calços de regulação
das folgas nos sistemas mecânicos – aplicação na
produção em série de um produto da indústria
automóvel**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica

Dezembro 2012

À minha mãe, ao meu irmão, e em memória do meu pai.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor António Mourão, pela confiança, apoio e disponibilidade, que foram imprescindíveis à realização desta dissertação.

Ao Eng.º Nuno Guerin pela disponibilização de toda informação.

A todo o corpo docente da FCT/UNL pela formação que me foi administrada ao longo destes 5 anos.

A todos os meus colegas com quem tive a oportunidade de trabalhar, em especial ao João Alves, ao Helson Soares e ao Guilherme Viegas, aos quais não podia deixar de manifestar a minha estima e consideração.

À minha família, particularmente à minha Mãe, pela educação, paciência, humildade, apoio, carinho e afecto que me tem transmitido com sapiência nesta caminhada árdua, e sem a qual não teria sido possível alcançar este sonho.

Ao meu pai por me ter ensinado que no *“pormenor está a perfeição”*, cuja sua memória esteve sempre presente.

Muito obrigado a todos.

Resumo

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento duma metodologia para a definição dos calços de regulação de folgas nos sistemas mecânicos, fundamentada na análise de tolerâncias de sistemas mecânicos.

Aplicou-se a metodologia na produção em série de um produto da indústria automóvel, que constituiu o caso de estudo, onde foram definidos os calços de regulação para o problema de ajuste das folgas obtidas na montagem, resultando numa solução mais favorável do que a existente.

Por último, realizou-se uma simulação de produção, na qual se obteve uma proposta que permita a automatização do processo de montagem do sistema mecânico analisado, através da selecção determinística dos calços de regulação.

Palavras-chave: calços de regulação, análise de tolerâncias, produção em série, sistemas mecânicos, automatização de montagem

Abstract

This work presents a development of a methodology for setting shims to the adjustment of clearances in mechanical systems, based on a tolerance analysis.

The methodology was applied in mass production of an automobile industry product, which was the case study, where were defined the shims to the problem of the adjustment of clearances obtained in assemblies, with a result more favorable than the current industrial solution used so far.

Finally, performed a simulation of production, where was achieved a proposal that allows the of assembly automation for a process of mass production of the analyzed mechanical system by a deterministic act of shims selection.

Keywords: shims, tolerance analysis, mass production, mechanical systems, assembly automation

Índice de Matérias

1 Introdução	1
1.1 Motivação e objectivos	1
1.2 Estrutura da dissertação.....	1
1.3 Calços de regulação de folgas	2
1.3.1 Generalidades	2
1.3.2 Tipos de calços de regulação.....	2
1.4 Toleranciamento	3
1.4.1 Noção de tolerância	3
1.4.2 Importância da engenharia simultânea no toleranciamento	4
2 Análise funcional de sistemas mecânicos	7
2.1 Introdução	7
2.2 Conceitos básicos	8
2.3 Cadeia mínima de cotas funcionais.....	9
2.4 Modelos de análise de tolerâncias dimensionais	10
2.4.1 Modelo da intermutabilidade total	10
2.4.2 Modelo estatístico simples	11
2.4.3 Modelo de <i>Spotts</i> modificado.....	11
2.4.4 Considerações quanto à utilização dos modelos de análise	12
3 Metodologia para a definição dos calços de regulação das folgas nos sistemas mecânicos.....	13
3.1 Introdução	13
3.2 Formulação analítica e geométrica	13
3.2.1 Método de atribuição dos calços de regulação.....	19
3.2.2 Fluxograma das etapas de aplicação da metodologia.....	20
4 Caso de estudo – aplicação da metodologia na produção em série de um produto da indústria automóvel.....	21
4.1 Caracterização do problema	21
4.2 Fluxograma do trabalho desenvolvido no caso de estudo	23
4.3 Análise da condição funcional do sistema mecânico	25

4.3.1	Cadeia mínima de cotas funcionais do conjunto.....	25
4.3.2	Identificação das cotas funcionais dos componentes	25
4.4	Definição dos calços de regulação das folgas para o caso de estudo.....	34
4.5	Simulação da produção - estimativa da utilização dos calços de regulação	36
5	Conclusões	41
	Bibliografia	43
	Anexo A: Desenhos Técnicos	45
	Anexo B: Código em linguagem Matlab® da rotina de simulação numérica da amostra de valores para a folga F_{obt}	79
	Anexo C: Determinação da função distribuição dos valores gerados para f_{obt}	81

Índice de Figuras

<i>Figura 1.1 – Calços de regulação</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1.2 – Calços de regulação de espessura variável (fonte: Spirol 2009)</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1.3 – Relação qualitativa entre os custos de produção e a tolerância a cumprir (adaptado de: Mourão 2004b).....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1.4 – Papel das tolerâncias no ciclo de vida de um produto (adaptado de: Hong e Chang 2002)</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1.5 – Relação entre custos efectivos e custos comprometidos ao longo do ciclo de vida de um produto (Adaptado de: Bakerjian 1992)</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.1 – Conjunto funcional</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.2 – Cadeia de cotas, cotas parciais crescentes e decrescentes, e cota resultante</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.3 – Superfícies funcionais percorridas numa dada direcção.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.4 – Cadeia mínima de cotas funcionais.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3.1 – Conjunto funcional onde se pretende obter a folga especificada utilizando um calço de regulação.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.2 – Obtenção da dimensão média de regulação, \bar{A}_{reg}, considerando que todas as cotas correspondem aos seus valores médios.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3.3 – Variação da folga obtida na análise funcional e da folga especificada</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3.4 – Variação da cota funcional dos calços de regulação para os possíveis valores da variação da folga</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.5 – Determinação do excesso de tolerância, Δ_{tol}</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.6 – Variação admissível da posição de cada calço de regulação dentro do campo da tolerância especificada.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3.7 – Configuração desejada entre as cotas funcionais nos calços de regulação adjacentes que garantem a continuidade da regulação</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3.8 – Eliminação da sobreposição de regulação</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.9 – Fluxograma da metodologia para a definição dos calços de regulação das folgas nos sistemas mecânicos.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4.1 – Elementos funcionais do sistema mecânico analisado (tirado do Anexo A.1)</i>	<i>21</i>
<i>Figura 4.2 – Montagem do conjunto funcional (tirado do Anexo A.2).....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4.3 – Folga especificada para o conjunto funcional (tirado do Anexo A.2)</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4.4 – Fluxograma do trabalho desenvolvido na dissertação</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4.5 – Cadeia mínima de cotas funcionais para o conjunto funcional sem o calço de regulação (tirado do Anexo A.3)</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4.6 – Cota funcional A (tirado do Anexo A.4)</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4.7 – Cota funcional B (tirado do Anexo A.5)</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4.8 – Cota funcional C (tirado do Anexo A.6)</i>	<i>26</i>

Figura 4.9 – Cota funcional D (tirado do Anexo A.7)	27
Figura 4.10 – Cota funcional E (tirado do Anexo A.8).....	27
Figura 4.11 – Cota funcional F (tirado do Anexo A.9).....	27
Figura 4.12 – Cota funcional G do mecanismo de transformação de movimento	28
Figura 4.13 – Cota G_1 que contém o ajustamento rotor-cavilha cilíndrica- cubo	28
Figura 4.14 – Cota funcional G_{1A} (tirado do Anexo A.10).....	29
Figura 4.15 – Cota funcional G_{1B} (tirado do Anexo A.11)	29
Figura 4.16 – Cota funcional G_{1C} (tirado do Anexo A.12)	29
Figura 4.17 – Cota funcional G_2 (tirado do Anexo A.13).....	30
Figura 4.18 – Cota funcional G_3 (tirado do Anexo A.14).....	30
Figura 4.19 – Ajustamento pistão – chavetas esféricas – prato oscilante	30
Figura 4.20 – Influência da tolerância da folga, $T_{F_{ajust}}$, no desvio de posição entre o eixo da cavidade esférica do pistão e o eixo de simetria das superfícies de contacto do prato oscilante.	31
Figura 4.21 – Cadeia mínima de cotas para a folga do ajustamento, F_{ajust} , entre o pistão, as chavetas esféricas e o prato oscilante	31
Figura 4.22 – Cotas funcionais A_1 e A_3 (tirado o do Anexo A.15).....	32
Figura 4.23 – Cota funcional A_2 (tirado do Anexo A.13).....	32
Figura 4.24 – Cota funcional A_4 (tirado do Anexo A.14).....	32
Figura 4.25 – Relação da tolerância, T_{cr} , com a quantidade necessária de calços, N'	35
Figura 4.26 – Fluxograma da rotina de geração de valores para a folga f_{obt}	36
Figura 4.27 – Histograma de frequências dos 1000 valores gerados para a f_{obt}	37
Figura 4.28 – Função distribuição de f_{obt}	38

Índice de Tabelas

<i>Tabela 3.1 – Relação da folga medida na montagem com o calço de regulação a utilizar</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 4.1 – Calços de regulação disponíveis na solução actual</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 4.2 – Resumo das cotas funcionais discriminadas para cada componente</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 4.3 – Variáveis necessárias para o dimensionamento dos calços de regulação</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 4.4 – Resultado do dimensionamento dos calços de regulação para o sistema mecânico analisado</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 4.5 – Relação entre a folga medida na montagem e o calço de regulação a utilizar</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 4.6 – Probabilidade de utilização de cada um dos 5 calços</i>	<i>39</i>
<i>Tabela A – Desenhos técnicos.....</i>	<i>45</i>

Lista de Abreviaturas

ASME *American Standard of Mechanical Engineers*

CAD *Computer Aided Design*

TGD Toleranciamento Geométrico e Dimensional

Lista de Símbolos

a	amplitude de cada classe de folga
\bar{A}_{reg}	dimensão média de regulação
c_i	variáveis aleatórias das cotas funcionais
C_i	cotas funcionais
C_{max_i}	valor máximo das cotas funcionais
C_{min_i}	valor mínimo das cotas funcionais
C_r^i	cotas funcionais dos calços de regulação
C_{res}	cota resultante
C_{pc_i}	cotas parciais crescentes
C_{pd_i}	cotas parciais decrescentes
d_{lote}	dimensão do lote de produção
F_{ajust}	folga do ajustamento
$f_{f_{obt}}(x)$	função densidade de probabilidade de f_{obt}
$F_{f_{obt}}(x)$	função distribuição de f_{obt}
F_{esp}	folga especificada
\bar{F}_{esp}	valor médio da folga especificada
$F_{esp_{max}}$	valor máximo da folga especificada
$F_{esp_{min}}$	folga especificada mínima
F_{med}	folga medida na montagem (sem o calco de regulação)
F_{med}^i	classe de folga medida na montagem (sem o calco de regulação)
f_{obt}	variável aleatória F_{obt}
F_{obt}	folga obtida na análise funcional (sem o calço de regulação)

\bar{F}_{obt}	valor médio de F_{obt}
F_{res}	folga resultante da montagem com o calço de regulação
N'	quantidade de calços de regulação
N_{comp}	número de compensação
T_{cr}	tolerância da cota funcional dos calços de regulação
T_{cr}^*	tolerância óptima da cota funcional dos calços de regulação
T_{ef_i}	tolerância dos elementos funcionais da cadeia de cotas
T_{esp}	tolerância especificada para a folga
T_i	tolerâncias das cotas funcionais
$T_{F_{ajust}}$	tolerância da folga do ajustamento
T_{res}	tolerância resultante da cadeia de cotas do conjunto funcional
Δ_{cr}	variação admissível entre posições ocupadas por cada calço de regulação
Δ_{cr}^*	variação admissível óptima entre posições ocupadas por cada calço de regulação
ΔF_{obt}	variação de F_{obt}
Δ_{tol}	excesso de tolerância
μ	valor médio
σ	desvio padrão

1 Introdução

1.1 Motivação e objectivos

A motivação para esta dissertação surge com o problema posto por uma empresa industrial (uma multinacional da indústria automóvel), que pretendia analisar a variação da folga da montagem de um produto, e verificar a possibilidade de automatizar a operação de colocação de calços de regulação da folga.

O problema constitui um caso de estudo em que a solução adoptada na empresa carece da análise de uma das condições funcionais - a folga obtida na montagem do conjunto.

A origem do problema poderá estar está relacionada com: (1) a variação excessiva das dimensões funcionais dos componentes produzidos; e (2) o toleranciamento dos componentes do sistema mecânico. Para a garantia da condição funcional, a solução actual passa pela utilização de calços de regulação. Todavia, esta solução limita a automatização da montagem em série, uma vez que não há um processo determinístico de selecção do calço.

Portanto, a solução actual é geradora de demoras e de alguma variabilidade da folga da montagem.

Pretende-se assim com esta dissertação:

- entender a origem dos valores das folgas;
- desenvolver uma metodologia para a definição dos calços de regulação das folgas obtidas na montagem dos sistemas mecânicos baseada na análise das tolerâncias dos seus componentes;
- apresentar uma proposta de solução alternativa para o caso de estudo que permita automatizar o processo produtivo.

1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos, dos quais o presente constitui a introdução, onde é descrita a própria estrutura e se abordam os calços de regulação e os conceitos de toleranciamento.

O capítulo 2 é referente à análise funcional de sistemas mecânicos sob o ponto de vista das tolerâncias, onde são abordados os meios para a identificação dos componentes que influenciam directamente a condição funcional do produto em estudo.

No capítulo 3 é desenvolvida a metodologia para a definição dos calços de regulação das folgas, que tem por base uma formulação analítica e geométrica.

No capítulo 4 aplica-se a metodologia desenvolvida para a definição dos calços de regulação das folgas obtidas na produção em série de um sistema mecânico da indústria

automóvel, que constitui o caso de estudo. Para isso, parte-se dos desenhos técnicos dos componentes e de conjunto para a análise da condição funcional em estudo; seguidamente, definem-se os calços de regulação das folgas obtidas na montagem, e aplicam-se os resultados obtidos numa simulação de produção, que permitirá obter uma solução alternativa à actual.

Finalmente, no capítulo 5 são enumeradas as principais conclusões tiradas do presente trabalho, e propõe-se uma sugestão para trabalho futuro nesta área.

1.3 Calços de regulação de folgas

1.3.1 Generalidades

Os calços de regulação de folgas (*shims*, na literatura inglesa) são elementos mecânicos utilizados para preencher o espaço existente entre componentes, e assim colmatar o excesso de folga existente numa montagem. A sua função principal é permitir a regulação da cota nominal duma folga tendo em conta a sua tolerância especificada.

Os calços^(a) têm grande aplicação na montagem de sistemas mecânicos, em particular, quando o número de componentes é elevado e/ou as tolerâncias são apertadas.

A sua utilização emprega-se, geralmente (Mourão 2001), para:

- compensar as folgas elevadas resultantes duma montagem, quando estas não se encontram dentro do valor especificado;
- alinhar a posição angular ou de paralelismo entre as superfícies de contacto dos diferentes componentes;
- colmatar o desgaste dos componentes resultante do seu movimento relativo durante o funcionamento, e garantir a precisão dimensional especificada para o conjunto;
- evitar tolerâncias apertadas nos componentes.

1.3.2 Tipos de calços de regulação

Existem duas tipologias de calços (Mourão 2001):

- **Calços de regulação de espessura fixa** (Figura 1.1). Estes calços são maquinados com a cota específica para cada montagem.
- **Calços de regulação de espessura variável** (Figura 1.2). Estes calços são produzidos, maioritariamente, através da colagem de folhas metálicas que podem ser facilmente removidas para obter a espessura desejada.

^(a) No decurso desta dissertação utiliza-se simplesmente o termo *calços* sempre que se pretenda referir a *calços de regulação de folgas*.



Figura 1.1 – Calços de regulação de espessura fixa (fonte: Jicey 2007)



Figura 1.2 – Calços de regulação de espessura variável (fonte: Spirol 2009)

A utilização de calços, quer de espessura fixa ou variável, na montagem de sistemas mecânicos apresenta a vantagem da minimização de custos de produção, fruto da possibilidade do alargamento das tolerâncias dos componentes sem a necessidade de maquinação extra destes, com vista ao cumprimento de especificações apertadas. Este aspecto é relevante uma vez que, como é sabido, os custos de produção aumentam exponencialmente com a diminuição do valor da tolerância (ver Figura 1.3).

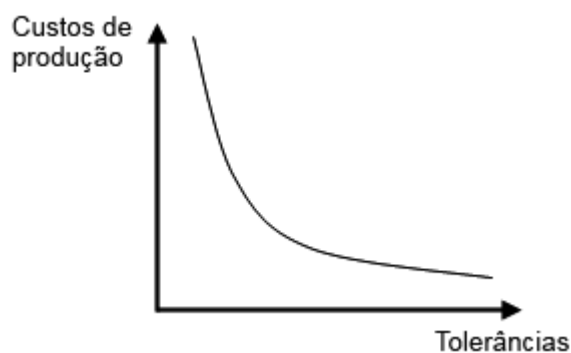


Figura 1.3 – Relação qualitativa entre os custos de produção e a tolerância a cumprir (adaptado de: Mourão 2004b)

Na pesquisa efectuada não foi encontrada nenhuma metodologia científica para a definição de calços de regulação de folgas em sistemas mecânicos. A informação que se encontrou foi de carácter comercial e informativo para aplicações industriais, mas sem qualquer indicação sobre o método a utilizar para a selecção racional dos calços numa montagem em série.

1.4 Toleranciamento

1.4.1 Noção de tolerância

O conceito primitivo do estudo de tolerâncias dimensionais surge da constatação de que é impossível a produção de qualquer componente nas suas dimensões exactas, ou seja, a característica de variação é inerente a qualquer processo produtivo.

A impossibilidade de cumprir exactamente a cota desejada leva a admitir, no fabrico, certa inexactidão que se tem de tolerar. Por isso chama-se tolerância a essa inexactidão admissível.

O conceito básico de tolerância dimensional pode ser entendido como a variação admitida, no projecto de um componente, para uma determinada dimensão.

Nos desenhos técnicos de engenharia são normalmente utilizados dois tipos de tolerâncias: a dimensional (variações admissíveis das dimensões) e a geométrica (variações admissíveis das características geométricas e/ou das posições relativas entre elas). Estes dois tipos de tolerâncias podem – em muitos casos devem (Campbell e Roth 2003, Chiabert et al. 1998, Cogorno 2006, Henzold 2006) – estar relacionados, constituindo este seu relacionamento uma actividade do projecto mecânico ainda muitas vezes descorado (Nielsen 2012, Mourão 2004a), provocando dificuldades no fabrico, na montagem e no controlo, devido às incongruências expressas nas tolerâncias.

Em termos mais teóricos existem dois tipos de sistemas de toleranciamento:

- **paramétrico**: consiste na identificação de um conjunto de parâmetros e atribuição de limites a estes de forma a definirem uma gama de valores aceitáveis (Requicha 1983), limitando os erros dimensionais no fabrico das peças, garantindo que estas depois de manufacturadas, obedecem às dimensões do desenho original (Cunha 2004);

- **geométrico**: é uma ferramenta de projecto, que comunica o intuito do desenho (Cogorno 2006) através de uma linguagem simbólica que especifica e atribui valores para certas propriedades de uma característica, tais como forma, orientação, localização, movimentação e perfil de um componente (Hong e Chang 2002, Cogorno 2006).

1.4.2 Importância da engenharia simultânea no toleranciamento

Na engenharia simultânea, várias áreas do sistema produtivo estão activamente envolvidas no projecto de produto. Cada sector contribui especificamente na sua área de actuação de maneira integrada, discutindo os melhores cenários de projecto, fabrico, montagem e controlo, que resultem num produto com maior qualidade a menor custo.

A Figura 1.4 descreve os fluxos de informação e físico (de componentes ou montagens), relacionados com as tolerâncias, em cada estágio do ciclo de vida do produto.

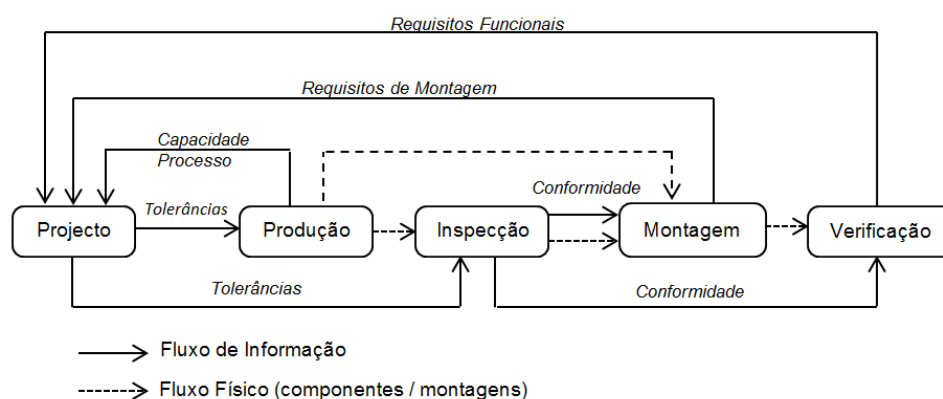


Figura 1.4 – Papel das tolerâncias no ciclo de vida de um produto (adaptado de: Hong e Chang 2002)

O valor atribuído para as tolerâncias, ao longo do ciclo de vida de um produto, varia em cada fase do processo de desenvolvimento, dependendo do estágio de concepção em que se encontra, e não é uma tarefa trivial levar em consideração todas estas variações quando se está a projectar (Prusak 2006).

Na fase inicial de desenvolvimento do produto os ganhos na optimização do projecto são maiores, uma vez que os custos efectivos são baixos face aos custos comprometidos (ver Figura 1.5).

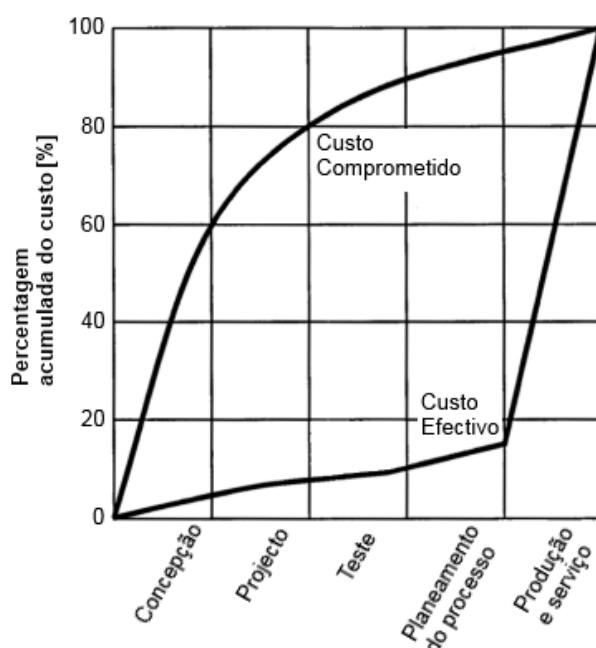


Figura 1.5 – Relação entre custos efectivos e custos comprometidos ao longo do ciclo de vida de um produto (Adaptado de: Bakerjian 1992)

Alguns estudos (Heilala et al. 2002, Spotts 1973, Mourão 2004b, Bakerjian 1992) têm mostrado que cerca de 60% dos custos comprometidos de um produto são determinados durante a sua fase de concepção, ou seja, no início do ciclo de vida do produto.

O problema do toleranciamento insere-se numa problemática mais vasta, resultante da constatação de que as reduções mais significativas nos custos de produção (fabrico e montagem) dependem mais de alterações no projecto do que de modificações de métodos ou sistemas da produção.

Estima-se (Heilala et al. 2002, Bakerjian 1992) que 30% a 50% de peças não conformes, que resultam em operações secundárias (*rework*, na literatura inglesa) são devidas ao mau toleranciamento. A necessidade da intermutabilidade dos componentes e a redução dos custos de produção, conduz a um estudo criterioso do toleranciamento.

Por outro lado, a escolha de tolerâncias mais largas terá como resultado custos acrescidos, mas de utilização dos produtos (Nielsen 2003). Estes custos manifestam-se sobre as características que determinam o *valor percebido*, isto é o valor que é incrementado ao produto associado à qualidade, eventuais problemas de montagem, e menores aptidões funcionais (*performance*, na literatura inglesa) do produto.

Sob o ponto de vista económico, a “perfeição” nem sempre é desejável. Na generalidade dos casos, existe uma tendência para baixar a gama de tolerâncias de forma a garantir funcionalidade. Não obstante, o bom toleranciamento deve adoptar um sistema de atribuição de tolerâncias (Hochmuth et al. 2000, Spotts 1973) que tenda a aumentar a gama de tolerâncias garantindo sempre a funcionalidade do produto.

O desafio da engenharia simultânea na atribuição de tolerâncias está em encontrar a gama de tolerâncias que minimiza os custos.

Comprova-se portanto, que para alcançar o sucesso na concepção de um produto, e assim obter uma vantagem competitiva na área do desenvolvimento de projecto, duas ferramentas específicas de projecto devem-se sobrepor às habituais práticas no sector da produção: uma equipa baseada em engenharia simultânea e uma definição completa do produto baseada nos princípios normalizados de dimensionamento e toleranciamento, denominado de toleranciamento geométrico e dimensional - TGD (Campbell e Roth 2003).

2 Análise funcional de sistemas mecânicos

2.1 Introdução

No contexto da presente dissertação, a análise funcional de um sistema mecânico prende-se com a identificação de cotas funcionais e determinação das suas dimensões nominais e respectivas tolerâncias, através da definição de cadeias mínimas de cotas, isto é, através do número mínimo de dimensões do conjunto funcional que descrevem a funcionalidade do mesmo (Singh et al. 2009a, Singh et al. 2009b).

A análise encerra em si a atribuição de um dimensionamento adequado às cotas funcionais de um componente, que quando montado garanta as funcionalidades especificadas pelo conjunto.

À medida que o desenvolvimento das técnicas industriais se vai processando, torna-se cada vez mais difícil executar uma *cotagem completa*. A *cotagem completa*, se bem que desejável, não é muitas vezes exequível, pois no estado actual da indústria não é praticamente possível que o engenheiro ou desenhador dos gabinetes de projecto conheçam em pormenor os processos de fabrico e a sequência por que estes são utilizados na oficina (Cunha 2004).

Em face destas dificuldades, começou a empregar-se uma nova forma de cotagem, nomeadamente, a cotagem funcional, que se baseia unicamente na funcionalidade das peças a cotar.

A cotagem funcional de um componente impõe que se comece por efectuar uma análise funcional deste, que permita identificar quais as dimensões que intervêm na funcionalidade de um sistema mecânico, dimensões estas a partir das quais é possível identificar quais as cotas nominais, dos vários componentes constituintes do sistema, onde incidirá o estudo criterioso do tolerânciamento.

A cotagem funcional constitui o critério de cotagem que leva ao maior alargamento de tolerâncias sem pôr em causa a funcionalidade expressa no projecto, e daí a sua importância.

Uma vez realizada a cotagem funcional dá-se a análise de tolerâncias, cujo procedimento visa a determinação da tolerância de um conjunto através do encadeamento das tolerâncias individuais de cada elemento.

Existem vários modelos de análise de tolerâncias. Nesta dissertação abordam-se os seguintes modelos de análise: intermutabilidade total, estatístico simples, e *Spotts* modificado.

2.2 Conceitos básicos

A fim de clarificar os procedimentos envolvidos na análise funcional de um sistema mecânico, apresentam-se os seguintes conceitos básicos (ver Figura 2.1 e Figura 2.2):

- **Conjunto funcional:** conjunto de componentes que constituem o sistema mecânico;
- **Elemento Funcional:** corresponde a cada um dos componentes constituintes do conjunto funcional;
- **Superfícies funcionais:** superfícies comuns aos elementos funcionais. Podem ser superfícies de contacto, ou superfícies terminais;

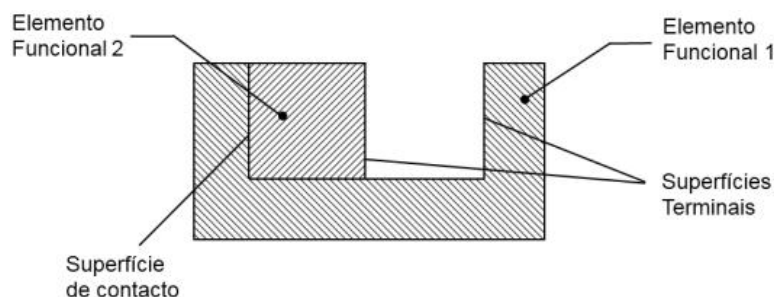


Figura 2.1 – Conjunto funcional

- **Cotas parciais:** dimensões nominais dos elementos ou conjuntos funcionais. As cotas parciais contêm todas as dimensões bem definidas (cota nominal e tolerância);
- **Cotas resultantes:** cotas situadas entre duas superfícies funcionais terminais adjacentes. As cotas nominais resultantes e suas tolerâncias são funções das cotas parciais. Serão identificadas com o símbolo (\longleftrightarrow);
- **Cotas parciais crescentes:** cotas cujo aumento provoca um acréscimo na cota resultante. Serão identificadas com o símbolo ($\bullet \rightarrow$);
- **Cotas parciais decrescentes:** cotas cujo aumento provoca um decréscimo na cota resultante. Serão identificadas com o símbolo ($\bullet \leftarrow$);
- **Cadeias de cotas:** série consecutiva de cotas (parciais e resultante) que formam um conjunto fechado, referido a um conjunto funcional.

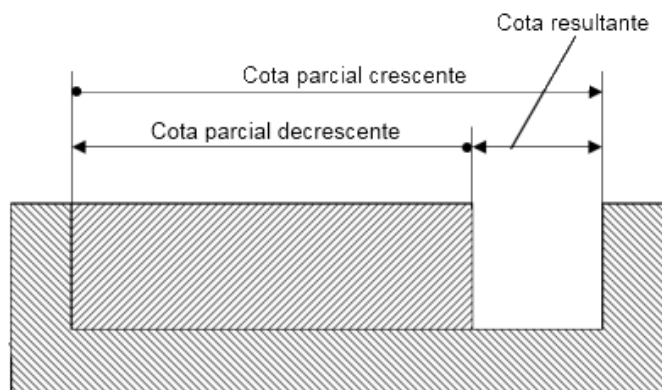


Figura 2.2 – Cadeia de cotas, cotas parciais crescentes e decrescentes, e cota resultante

2.3 Cadeia mínima de cotas funcionais

A regra fundamental da cotação funcional estabelece que ao determinar uma **cadeia mínima de cotas funcionais**, deve criar-se o mínimo caminho possível numa direcção, que partindo de uma superfície funcional qualquer, passe exclusivamente por todas as outras superfícies de contacto e por apenas duas superfícies terminais adjacentes, retomando à superfície funcional de partida, fechando o ciclo.

A cadeia mínima de cotas funcionais resulta numa equação que permite obter a cota resultante em função das cotas parciais; a esta chama-se *relação funcional da cadeia de cotas*:

$$C_{res} = \sum_i C_{pc_i} - \sum_j C_{pd_j} \quad (2.1)$$

onde:

C_{res} - cota resultante;

C_{pc_i} - cotas parciais crescentes na cadeia de cotas;

C_{pd_j} - cotas parciais decrescentes na cadeia de cotas.

Seguidamente apresenta-se o método para obtenção da relação funcional de uma cadeia de cotas num conjunto funcional:

- I. Escolher uma direcção, e identificar quais as superfícies funcionais de contacto e terminais percorridas na direcção escolhida (Figura 2.3);

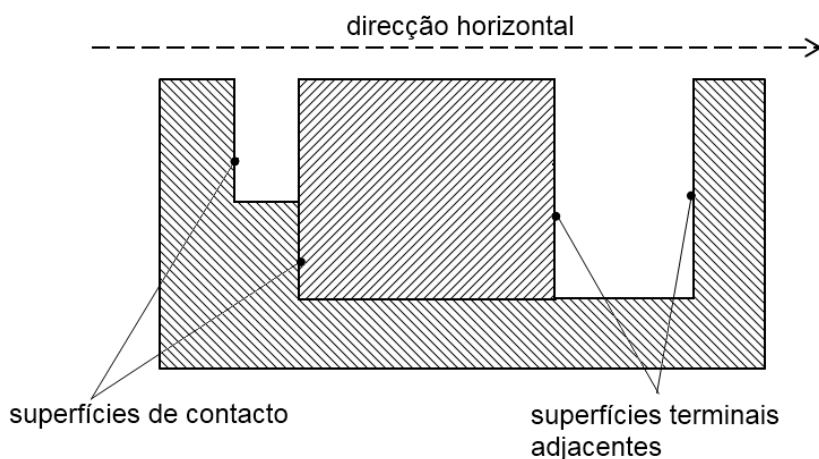


Figura 2.3 – Superfícies funcionais percorridas numa dada direcção

- II. Estabelecer a cadeia mínima de cotas identificando as cotas parciais crescentes, decrescentes e resultante (Figura 2.4);

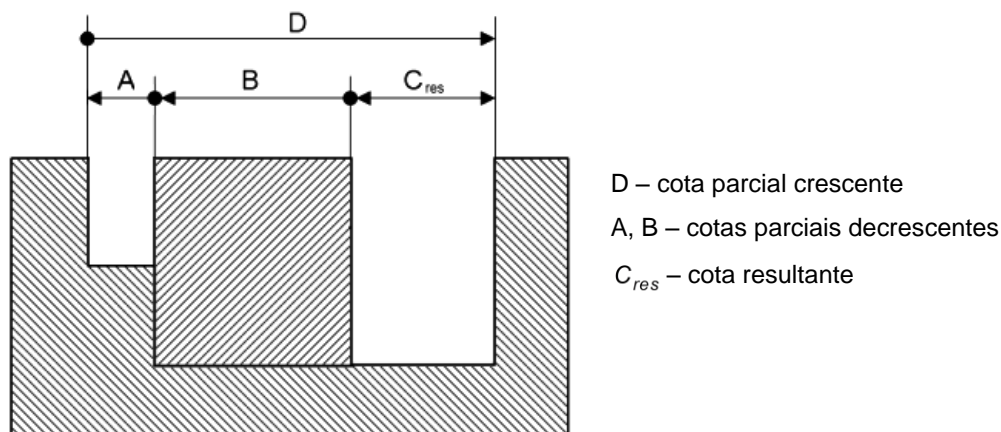


Figura 2.4 – Cadeia mínima de cotas funcionais

- III. Escrever a relação funcional da cadeia mínima de cotas, equação (2.1).

$$C_{res} = D - (A + B) \quad (2.2)$$

2.4 Modelos de análise de tolerâncias dimensionais

2.4.1 Modelo da intermutabilidade total

Este modelo de análise, também conhecido como o modelo de encadeamento de tolerâncias (*stack-up*, na literatura inglesa), utiliza-se quando (Umaras 2010):

- não existem informações, nem sobre os processos de fabricação dos componentes, nem acerca do controlo estatístico da qualidade;
- quando o conjunto é formado por poucos componentes que estão sujeitos a restrições dimensionais críticas devido à função do sistema mecânico, isto é, não são permitidos quaisquer índices de rejeição.

No modelo da intermutabilidade total, a tolerância resultante de uma cadeia de cotas, é calculada somando linearmente as tolerâncias dos componentes:

$$T_{res} = \sum_i T_{ef_i} \quad (2.3)$$

onde:

T_{res} - tolerância resultante da cadeia de cotas do conjunto funcional;

T_{ef_i} - tolerâncias dos elementos funcionais na cadeia de cotas.

O modelo da intermutabilidade total é o mais simples de todos os existentes e garante, como o nome indica, a intermutabilidade total dos componentes, seja qual for a cadeia de cotas e a distribuição de tolerâncias. Contudo devem ser tomadas cadeias mínimas de cotas (Mourão 2004b, Umaras 2010).

2.4.2 Modelo estatístico simples

O modelo estatístico simples baseia-se no conceito fundamental do teorema do limite central (Montgomery 2003), que afirma que a distribuição da soma de variáveis independentes, com média e variância finitas, aproxima-se da distribuição normal quando o número de distribuições torna-se suficientemente elevado.

Este modelo assenta-se na pequena probabilidade, de que num elevado número de ocorrências, os componentes tenham dimensões reais próximas ou iguais aos limites toleranciados (Mourão 2004b). As combinações possíveis de valores extremos de tolerância são pouco prováveis, quando comparadas com as combinações de valores médios.

No caso das dimensões reais dos diferentes componentes seguirem uma distribuição normal, a tolerância resultante do conjunto funcional vem dada por:

$$T_{res} = \left(\sum_{i=1}^n T_{ef_i}^2 \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

Para distribuições assimétricas, ou com desvios do valor médio (ocorrências inevitáveis na realidade), o toleranciamento obtido pelo modelo estatístico simples pode levar a uma percentagem de rejeição que assume valores inaceitáveis.

2.4.3 Modelo de *Spotts* modificado

O modelo de *Spotts* modificado é uma combinação dos dois modelos anteriores, nomeadamente, o da intermutabilidade total e o estatístico simples (Singh et al. 2009a).

A tolerância resultante do conjunto resulta da média dos valores obtidos pelos dois modelos de análise. A sua expressão analítica é dada pela equação (2.5).

$$T_{res} = 0,5 \times \left[\sum_{i=1}^n T_{ef_i} + \left(\sum_{i=1}^n T_{ef_i}^2 \right)^{1/2} \right] \quad (2.5)$$

Para resolver a dificuldade inerente às variações das funções de distribuição das dimensões dos componentes, o modelo utiliza uma via de segurança pelo facto de fazer uso parcial de todo o campo de tolerância.

2.4.4 Considerações quanto à utilização dos modelos de análise

Estudos realizados com o objectivo de testar a eficácia dos vários modelos de análise comparativamente ao modelo da intermutabilidade total permitiram retirar algumas conclusões (Perez et al. 2011, Spotts 1973, Hong e Chang 2002, Singh et al. 2009a, Singh et al. 2009b):

- A tolerância dos conjuntos funcionais, obtida pelos modelos estatísticos aumenta, com o aumento do número de componentes, quando as tolerâncias dos elementos funcionais são iguais; quando estas são diferentes, as tolerâncias dos modelos estatísticos não são muito díspares do modelo da intermutabilidade total;
- O tipo da função de distribuição estatística das dimensões de cada elemento funcional influi significativamente no valor da tolerância calculada. Este facto implica que haja um profundo conhecimento das distribuições, caso poder-se-ão provocar erros intoleráveis (como por exemplo, um número significativo de montagens cuja tolerância dos conjunto seja superior à tolerância especificada);
- Os modelos estatísticos e de Spotts modificado têm como vantagem, relativamente ao modelo da intermutabilidade total, um baixo valor para a tolerância do conjunto, especialmente quando o número de componentes é elevado. Todavia, esta vantagem é condicionada pela distribuição de tolerâncias dos componentes, além de deixar de ser muito significativa quando a cadeia de cotas tem tolerâncias diferentes. O grande inconveniente destes modelos é a dependência da informação, mais acentuada nuns modelos do que noutros;
- Além do modelo da intermutabilidade total, todos os outros necessitam de informação de natureza estatística que, para ser fiável, necessita de um tratamento num universo relativamente vasto, o que limita a sua utilização a casos em que existe uma grande produção dos conjuntos a montar. Perante este facto recomenda-se o uso do modelo da intermutabilidade total quando não são conhecidas as distribuições estatísticas das cotas funcionais dos diferentes componentes do conjunto funcional.

Independentemente dos métodos de análise utilizados, verifica-se que nos casos em que a soma das tolerâncias dos componentes é superior à tolerância especificada para a folga, o problema não terá solução a não ser que a tolerância da folga seja aumentada ou que se inclua na montagem um calço de regulação. Na generalidade dos casos, para a resolução do problema não é possível alterar o valor da folga uma vez que este constitui uma especificação funcional a cumprir, donde a solução passa pela utilização de calços.

3 Metodologia para a definição dos calços de regulação das folgas nos sistemas mecânicos

3.1 Introdução

O objectivo da metodologia para a definição dos calços de regulação das folgas em sistemas mecânicos consiste na determinação das cotas funcionais dos calços de regulação de espessura fixa, C_r^i , que permitam ajustar as folgas de sistemas mecânicos produzidos em série, e que se encontram fora do valor especificado.

Esta metodologia de definição aplica-se nos casos em que o valor obtido na análise funcional da folga da montagem do sistema mecânico (sem o calço de regulação), F_{obt} , não cumpre os valores especificados (F_{esp}).

$$F_{obt} \notin [F_{espmin}; F_{espmax}] \quad (3.1)$$

e a variação da folga, determinada na análise de tolerâncias da montagem, ΔF_{obt} , é superior à sua tolerância especificada, T_{esp} :

$$T_{esp} \leq \Delta F_{obt} \quad (3.2)$$

Pretende-se, através da introdução de um calço no conjunto, previamente seleccionado em função da classe de folga medida na montagem, F_{med}^i , que a folga resultante da montagem, F_{res} , fique dentro do valor especificado, condição expressa pelas equações (3.3) e (3.4).

$$F_{res} = F_{med}^i - C_r^i \quad (3.3)$$

$$F_{espmin} \leq F_{res} \leq F_{espmax} \quad (3.4)$$

3.2 Formulação analítica e geométrica

Considere-se o conjunto funcional da Figura 3.1, onde se pretende obter a folga F_{esp} , através da introdução de um calço.

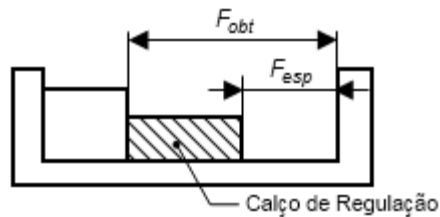


Figura 3.1 – Conjunto funcional onde se pretende obter a folga especificada utilizando um calço de regulação

Admita-se que todas as cotas representadas na Figura 3.1 condizem aos seus valores nominais médios.

À partida, a solução do problema seria alcançada através da introdução de um calço cuja cota funcional seria igual à dimensão média de regulação, \bar{A}_{reg} , dada, de acordo com a Figura 3.2, pela equação (3.5).

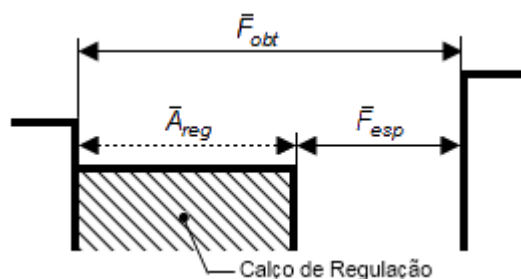


Figura 3.2 – Obtenção da dimensão média de regulação, \bar{A}_{reg} , considerando que todas as cotas correspondem aos seus valores médios

$$\bar{A}_{reg} = \bar{F}_{obt} - \bar{F}_{esp} \quad (3.5)$$

Contudo, devido à diferença existente entre ΔF_{obt} e T_{esp} , a cota funcional do calço necessário à regulação pode variar para além do valor médio \bar{A}_{reg} .

A Figura 3.3 mostra a possível variação da \bar{F}_{obt} e a variação admissível da \bar{F}_{esp} , devido a ΔF_{obt} e T_{esp} , respectivamente.

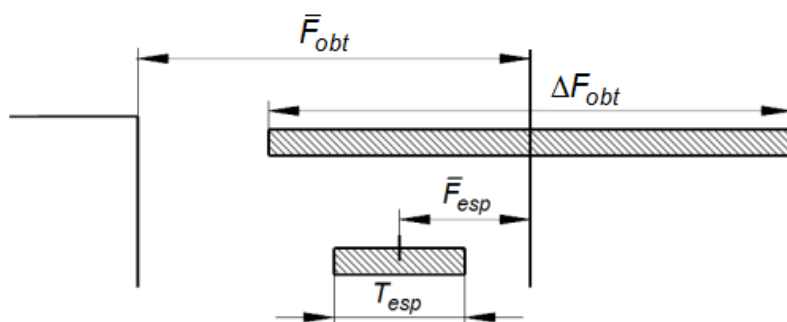


Figura 3.3 – Variações da folga obtida na análise funcional e da folga especificada

Devido a estas variações não é possível produzir apenas um calço que satisfaça o problema numa produção em série de vários sistemas mecânicos.

Com isto, pretende determinar-se a quantidade necessária de dimensões para as cotas funcionais dos calços e respectiva tolerância.

A regulação da folga é conseguida através de várias dimensões para a cota funcional dos calços, o que corresponderá a haver diferentes calços, cada um com uma das dimensões. Assim, a determinados intervalos da folga obtida corresponderá apenas uma dimensão (um calço) que leva a folga ao valor especificado, em cada conjunto montado na produção em série.

A análise de tolerâncias utilizada no desenvolvimento desta metodologia efectua-se tendo por base o modelo da intermutabilidade total, dado que este garante rejeição nula.

A Figura 3.4 ajuda a ilustrar a variação da cota funcional dos calços, desde o menor valor (C_r^1) ao maior ($C_r^{N'}$), para os possíveis valores que a folga F_{obt} pode ter na montagem do conjunto funcional, numa variação ΔF_{obt} . A dimensão T_{cr} representa a tolerância dos calços, considerada igual para todos.

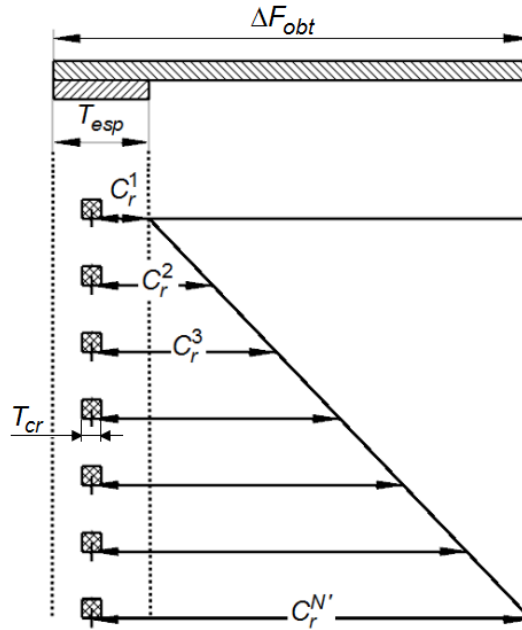


Figura 3.4 – Variação da cota funcional dos calços de regulação para os possíveis valores da variação da folga

À medida que ΔF_{obt} aumenta, para obter a folga especificada, é necessário colmatar este espaço através de sucessivos acréscimos na dimensão da cota funcional dos calços, o que se traduz na utilização de um calço maior.

Este espaço, a que se chamará excesso de tolerância, Δ_{tol} , será dado pela diferença entre a tolerância resultante da montagem de todos os elementos funcionais (incluindo agora a tolerância das cotas funcionais dos calços de regulação, T_{cr}) e a tolerância especificada.

De acordo com a Figura 3.5, o excesso de tolerância é dado pela equação (3.6).

$$\Delta_{tol} = (\Delta F_{obt} - T_{esp}) + T_{cr} \quad (3.6)$$

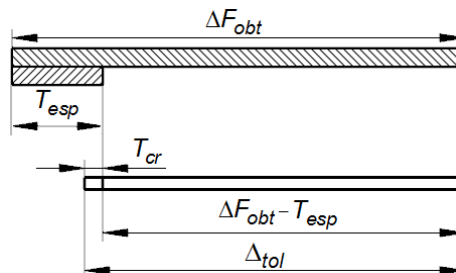


Figura 3.5 – Determinação do excesso de tolerância, Δ_{tol}

O Δ_{tol} representa a quantidade que é necessária colmatar com o calço. Assim, uma vez conhecido o Δ_{tol} é possível determinar o número de compensações necessárias para a regulação da folga, através da variação admissível da posição de cada calço dentro da T_{esp} , à medida que vai variando Δ_{tol} .

A variação admissível entre posições ocupadas por cada calço de regulação, Δ_{cr} , de acordo com a Figura 3.6 é dada pela equação (3.7).

$$\Delta_{cr} = T_{esp} - T_{cr} \quad (3.7)$$

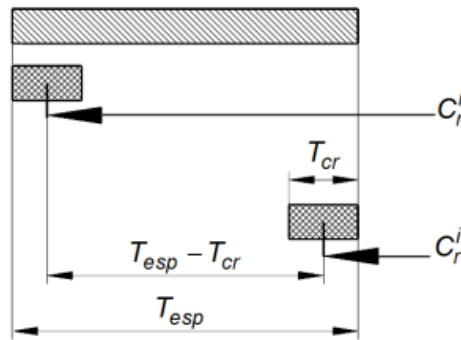


Figura 3.6 – Variação admissível da posição de cada calço de regulação dentro do campo da tolerância especificada

Deste modo, conclui-se que para garantir continuidade da regulação, as cotas funcionais nos calços adjacentes terão de ter a configuração apresentada na Figura 3.7.

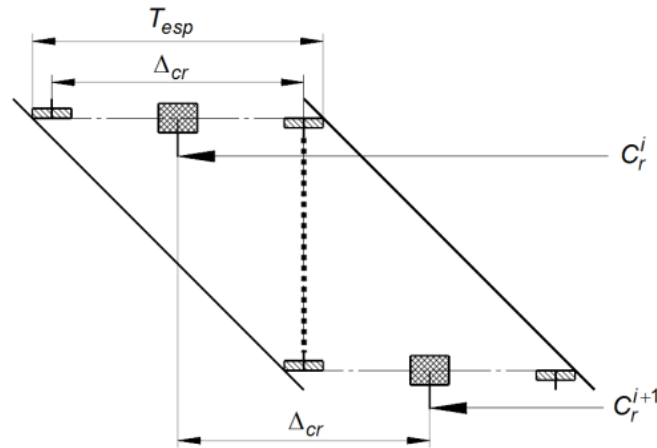


Figura 3.7 – Configuração desejada entre as cotas funcionais nos calços de regulação adjacentes que garantem a continuidade da regulação

O acréscimo da cota funcional nos calços adjacentes é dado pela equação (3.8).

$$C_r^{i+1} = C_r^i + \Delta_{cr} \quad (3.8)$$

O número de compensações necessárias para abranger o excesso de tolerância, denominada por número de compensação, N_{comp} , vem assim expresso pela equação (3.9):

$$N_{comp} = \frac{\Delta_{tol}}{\Delta_{cr}} \quad (3.9)$$

A quantidade de calços de regulação, N' , vem então dada pela função menor inteiro ^(b) da seguinte expressão:

$$N' = \lceil N_{comp} + 1 \rceil \quad (3.10)$$

Atendendo ao resultado da equação (3.6), o Δ_{tol} resulta agora:

$$\Delta_{tol} = \Delta F_{obt} - \Delta_{cr} \quad (3.11)$$

Juntando os resultados das equações (3.6), (3.9), (3.10) e (3.11), N' vem dado pela equação (3.12).

$$N' = \left\lceil \frac{\Delta F_{obt}}{T_{esp} - T_{cr}} \right\rceil \quad (3.12)$$

Tendo em conta o valor inteiro resultante para N' , dado pela equação (3.12), o acréscimo da cota funcional nos calços adjacentes, dada pela equação (3.8), resulta:

$$C_r^{i+1} = C_r^i + \frac{\Delta F_{obt}}{N'} \quad (3.13)$$

Falta ainda obter as cotas funcionais dos N' calços de regulação. Sendo conhecida a relação das cotas funcionais nos calços adjacentes, basta apenas determinar a menor dimensão para a cota funcional do calço de regulação, C_r^1 .

Como a única dimensão nominal conhecida é \bar{A}_{reg} , dada pela equação (3.5), parte-se da definição de valor médio, que para os N' calços de regulação vem:

$$\bar{A}_{reg} = \frac{\sum_{i=1}^{N'} C_r^i}{N'} = \frac{C_r^1 + C_r^2 + C_r^3 + \dots + C_r^{N'}}{N'} \quad (3.14)$$

Por outro lado, através da Figura 3.7, constata-se que:

$$\begin{aligned} C_r^2 &= C_r^1 + \frac{\Delta F_{obt}}{N'} \\ C_r^3 &= C_r^2 + \frac{T_{cf}}{N'} = C_r^1 + 2 \cdot \frac{\Delta F_{obt}}{N'} \\ &\vdots \\ C_r^{N'} &= C_r^{N'-1} + \frac{\Delta F_{obt}}{N'} = C_r^1 + (N'-1) \cdot \frac{\Delta F_{obt}}{N'} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Atendendo aos resultados da equação (3.15) vem agora:

$$\bar{A}_{reg} = \frac{C_r^1 + \left(C_r^1 + \frac{\Delta F_{obt}}{N'}\right) + \left(C_r^1 + 2 \cdot \frac{\Delta F_{obt}}{N'}\right) + \left(C_r^1 + 3 \cdot \frac{\Delta F_{obt}}{N'}\right) \dots + \left(C_r^1 + (N'-1) \cdot \frac{\Delta F_{obt}}{N'}\right)}{N'} \quad (3.16)$$

^(b) A função *menor inteiro* de x é aquela que devolve o menor número inteiro maior ou igual a x . Define-se matematicamente por: $\lceil x \rceil = \min\{m \in \mathbb{Z} \mid m \geq x\}$, em que \mathbb{Z} representa o conjunto de todos os números inteiros.

Reordenando os termos da equação (3.16):

$$\bar{A}_{reg} = \frac{C_r^1 \cdot N' + \frac{\Delta F_{obt}}{N'} \cdot [1 + 2 + 3 + \dots + (N' - 1)]}{N'} \quad (3.17)$$

O termo $[1 + 2 + 3 + \dots + (N' - 1)]$ representa uma progressão aritmética cuja soma^(c) é:

$$[1 + 2 + 3 + \dots + (N' - 1)] = \frac{(N' - 1) \cdot ([N' - 1] + 1)}{2} = \frac{(N' - 1) \cdot N'}{2} \quad (3.18)$$

A dimensão média de regulação resulta assim:

$$\bar{A}_{reg} = C_r^1 + \left(\frac{N' - 1}{2 \cdot N'} \right) \cdot \Delta F_{obt} \quad (3.19)$$

A dimensão menor para a cota funcional dos calços de regulação, vem finalmente, juntado os resultados das equações (3.4) e (3.19):

$$C_r^1 = \bar{F}_{obt} - \left[\bar{F}_{esp} + \left(\frac{N' - 1}{2 \cdot N'} \right) \cdot \Delta F_{obt} \right] \quad (3.20)$$

Devido ao valor inteiro de N' a variação Δ_{cr} virá também acrescida, tendo influência na configuração de regulação desejada, anteriormente ilustrada na Figura 3.7.

O acréscimo em Δ_{cr} faz com que exista uma sobreposição de regulação na utilização de calços sucessivos, isto é, existe um intervalo de folga que é satisfeito por ambos os calços C_r^i e C_r^{i+1} .

É possível eliminar esta *sobreposição* de regulação desnecessária aumentando a tolerância do calço (Figura 3.8-A), de forma a verificar-se novamente a configuração desejada (Figura 3.8-B).

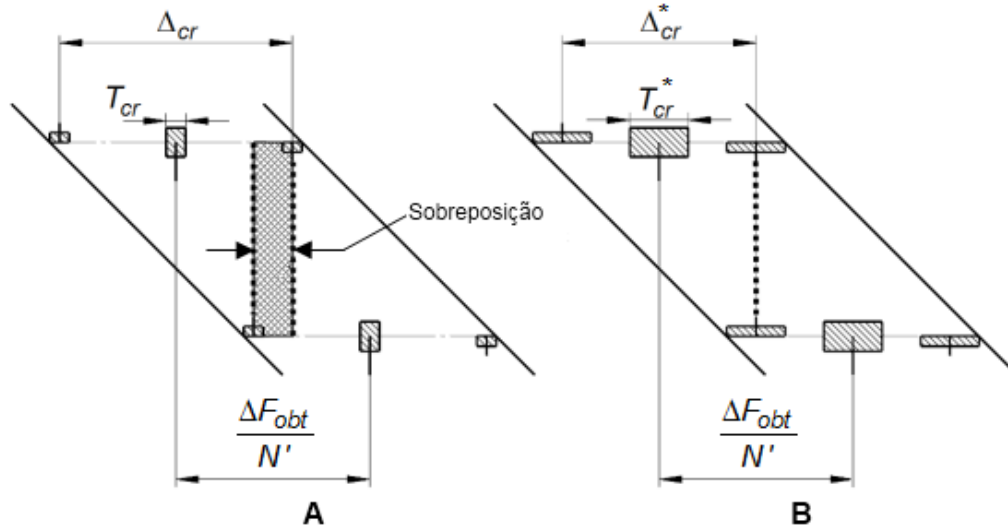


Figura 3.8 – Eliminação da sobreposição de regulação

^(c) A soma dos k primeiros termos de uma progressão aritmética pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$\sum_{i=1}^k i = (1 + 2 + 3 + \dots + k) = \frac{k \cdot (k + 1)}{2}.$$

A sobreposição de acordo com a Figura 3.8-A será:

$$\text{sobreposição} = \Delta_{cr} - \frac{\Delta F_{obt}}{N'} \quad (3.21)$$

De modo a minimizar a sobreposição (Figura 3.8-B), a variação admissível óptima da posição do calço de regulação, Δ_{cr}^* , terá de ser tal que satisfaça:

$$\min(\text{sobreposição}) \geq \Delta_{cr}^* - \frac{\Delta F_{obt}}{N'} \quad (3.22)$$

No caso limite, a sobreposição toma o valor zero e a variação Δ_{cr}^* resulta como solução da equação (3.22):

$$\Delta_{cr}^* = \frac{\Delta F_{obt}}{N'} \quad (3.23)$$

Atendendo à equação (3.7), constata-se que a tolerância óptima das cotas funcionais dos calços de regulação, T_{cr}^* , vem assim dada pela equação (3.24).

$$T_{cr}^* = T_{esp} - \frac{\Delta F_{obt}}{N'} \quad (3.24)$$

3.2.1 Método de atribuição dos calços de regulação

A fim de permitir uma automatização de processo de selecção dos calços, elaborou-se uma tabela de classes dos mesmos.

A Tabela 3.1, de relação entre a folga medida na montagem e o calço de regulação correspondente a utilizar, terá N' classes em que a amplitude de cada classe de folga medida, a , é dada pela equação (3.25).

$$a = \frac{\Delta F_{obt}}{N'} \quad (3.25)$$

Tabela 3.1 – Relação da folga medida na montagem com o calço de regulação a utilizar

Calço de regulação, i	Folga medida, F_{med}^i	Cota funcional do calço, C_r^i
# 1	$[F_{obt_{min}} ; F_{obt_{min}} + a[$	$C_r^1 \pm \frac{T_{cr}^*}{2}$
# 2	$[F_{obt_{min}} + a ; F_{obt_{min}} + 2 \cdot a[$	$C_r^2 \pm \frac{T_{cr}^*}{2}$
⋮	⋮	⋮
# N'	$[F_{obt_{min}} + (N' - 1) \cdot a ; F_{obt_{min}} + N' \cdot a]$	$C_r^{N'} \pm \frac{T_{cr}^*}{2}$

Para cada conjunto, a atribuição do calço através da relação expressa na Tabela 3.1 permite obter a folga resultante, F_{res} , dentro do valor especificado. Esta F_{res} resulta já da introdução do calço na montagem.

3.2.2 Fluxograma das etapas de aplicação da metodologia

O fluxograma da Figura 3.9 clarifica a relação e a hierarquia entre as etapas de aplicação da metodologia para definição dos calços de regulação das folgas num sistema mecânico.

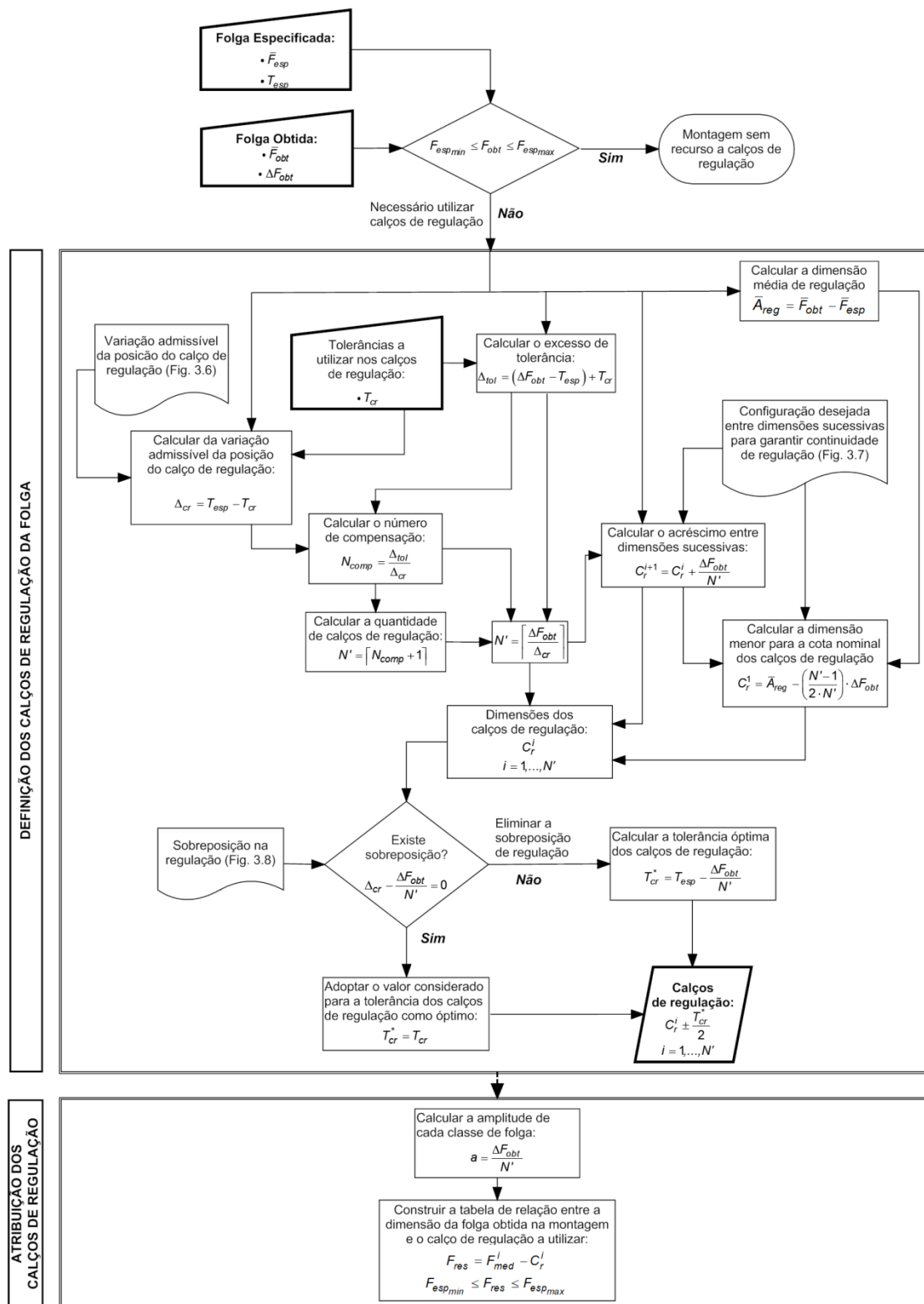


Figura 3.9 – Fluxograma da metodologia para a definição dos calços de regulação das folgas nos sistemas mecânicos

4 Caso de estudo – aplicação da metodologia na produção em série de um produto da indústria automóvel

4.1 Caracterização do problema

Neste capítulo aplica-se a metodologia desenvolvida em § 3 ao caso de estudo, tendo como objectivo solucionar um problema verificado numa empresa industrial.

O caso de estudo analisado, representado na Figura 4.1 pelos seus componentes funcionais, constitui parte de um sistema mecânico integrante de um compressor de ar condicionado para aplicação na indústria automóvel.

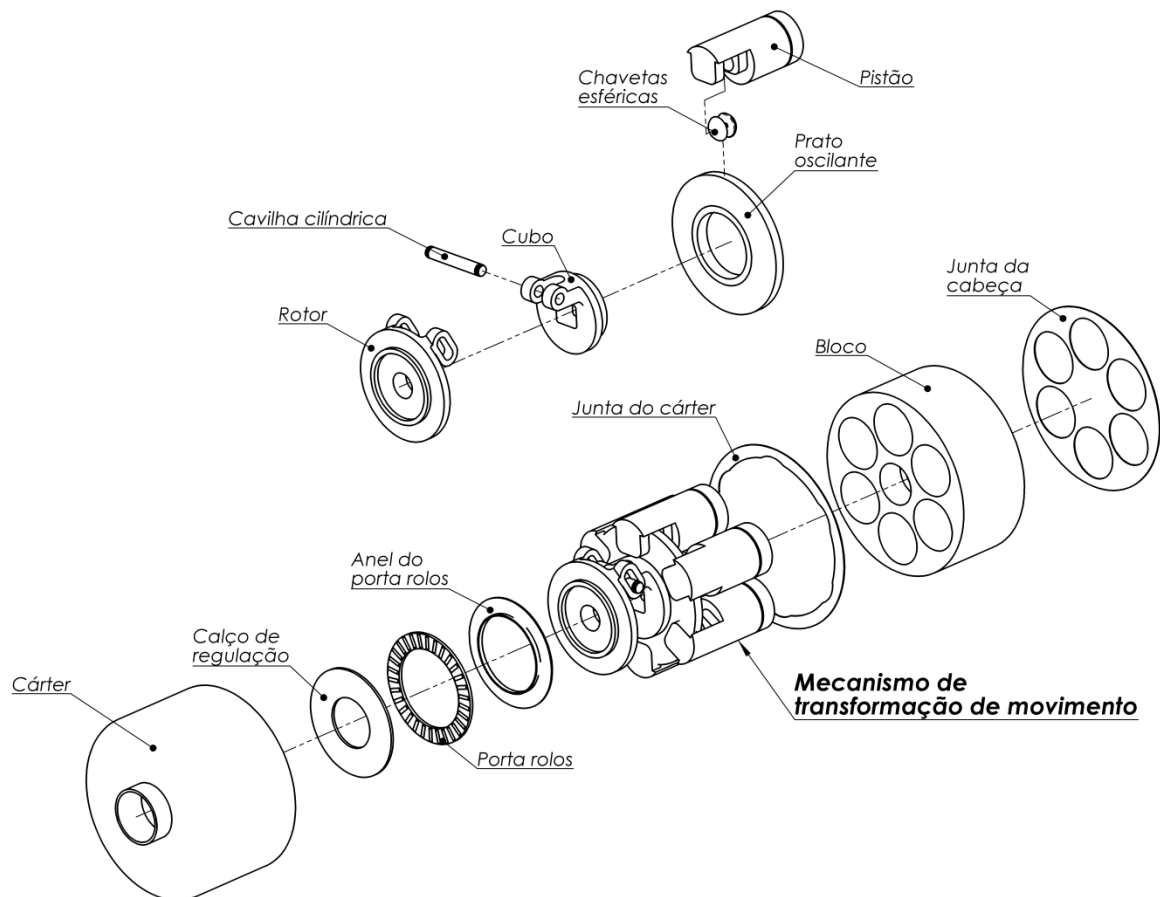


Figura 4.1 – Componentes funcionais do sistema mecânico analisado (tirado do Anexo A.1)

A Figura 4.2 mostra a montagem do conjunto funcional, em corte longitudinal, com identificação dos componentes funcionais.

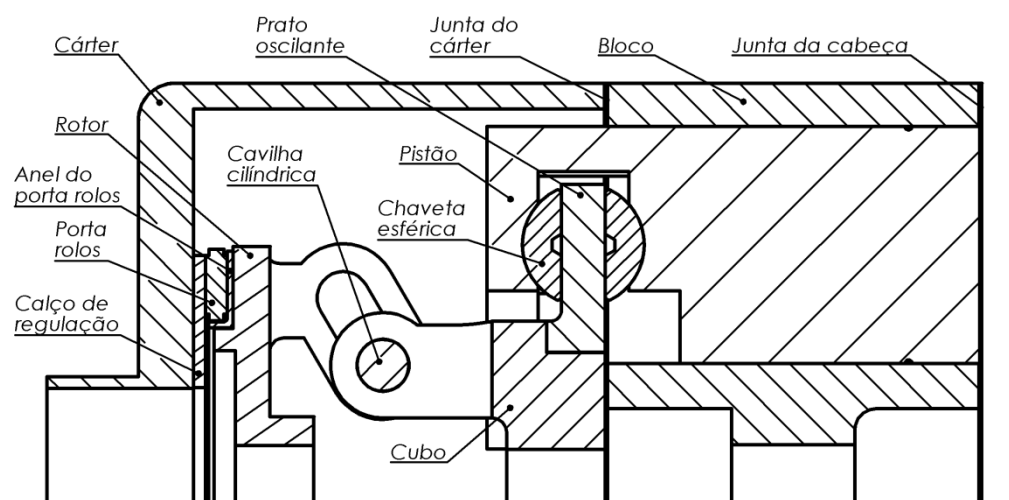


Figura 4.2 – Montagem do conjunto funcional (tirado do Anexo A.2)

O projecto especifica que, para garantir o funcionamento do conjunto, após a montagem dos componentes tem de existir entre os pistões e a face superior da junta da cabeça uma folga, como mostra a Figura 4.3.

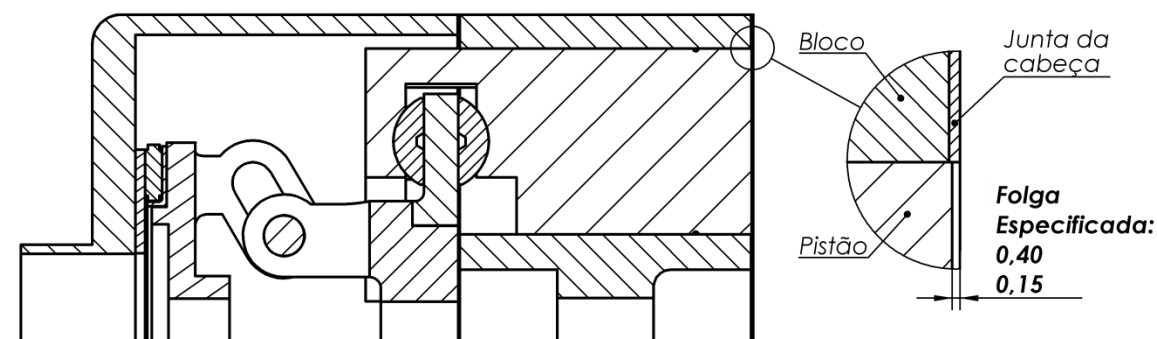


Figura 4.3 – Folga especificada para o conjunto funcional (tirado do Anexo A.2)

A folga especificada e a sua tolerância serão portanto:

- $F_{esp} = 0,275 \text{ mm}$
- $T_{esp} = 0,250 \text{ mm}$

A solução actual baseia-se na regulação da folga através de calços. A empresa tem disponíveis 13 calços para o efeito, com as dimensões indicadas na Tabela 4.1 e todos com uma especificação de tolerância de 0,040 mm. Para cada conjunto montado é necessário medir a folga e seleccionar um calço que ajuste a folga ao valor especificado.

Tabela 4.1 – Calços de regulação disponíveis na solução actual

Calços	Dimensões [mm]
# 1	[1,18 ; 1,22]
# 2	[1,28 ; 1,32]
# 3	[1,38 ; 1,42]
# 4	[1,43 ; 1,47]
# 5	[1,48 ; 1,52]
# 6	[1,53 ; 1,57]
# 7	[1,58 ; 1,62]
# 8	[1,63 ; 1,67]
# 9	[1,68 ; 1,72]
# 10	[1,73 ; 1,77]
# 11	[1,78 ; 1,82]
# 12	[1,88 ; 1,92]
# 13	[1,98 ; 2,02]

Os sistemas mecânicos obtidos resultam numa grande produção em série, e a solução actual impede a automatização da produção, pois para cada unidade em montagem não é possível precisar qual o calço a utilizar para ajustar a folga, o que faz com que o procedimento de selecção dos calços seja tentativa-erro.

Além disso, a empresa manifestou a necessidade de perceber se a variação da folga na montagem (sem o calço) é natural (isto é, decorrente dos valores das tolerâncias especificadas no projecto), ou se é proveniente de uma eventual variabilidade excessiva no fabrico dos componentes. É de referir que a análise das tolerâncias não foi realizada pela empresa, como de resto é usual nas unidades de produção, não obstante de haver uma análise de verificação da capacidade de fabrico para cada cota e respectiva tolerância.

4.2 Fluxograma do trabalho desenvolvido no caso de estudo

A solução proposta pretende tornar exequível a automatização do processo de montagem do conjunto. A automatização é possível sabendo *a priori*: (1) quais as cotas funcionais dos calços de regulação que levam a folga, de cada produto em particular, ao valor especificado, e (2) qual a dispersão estatística da folga, permitindo assim estimar a quantidade de calços de regulação que terá de ser produzida, para cada cota funcional destes.

O fluxograma da Figura 4.4 representa as etapas do trabalho que foi desenvolvido no caso de estudo, e que permitiram a consecução da solução proposta ao caso de estudo. Este fluxograma é constituído por três grandes blocos apresentados nos subcapítulos seguintes, nomeadamente: Análise da condição funcional do sistema mecânico (§ 4.3), Definição dos calços de regulação das folgas para o caso de estudo (§ 4.4), e Simulação da produção - estimativa da utilização dos calços de regulação (§ 4.5).

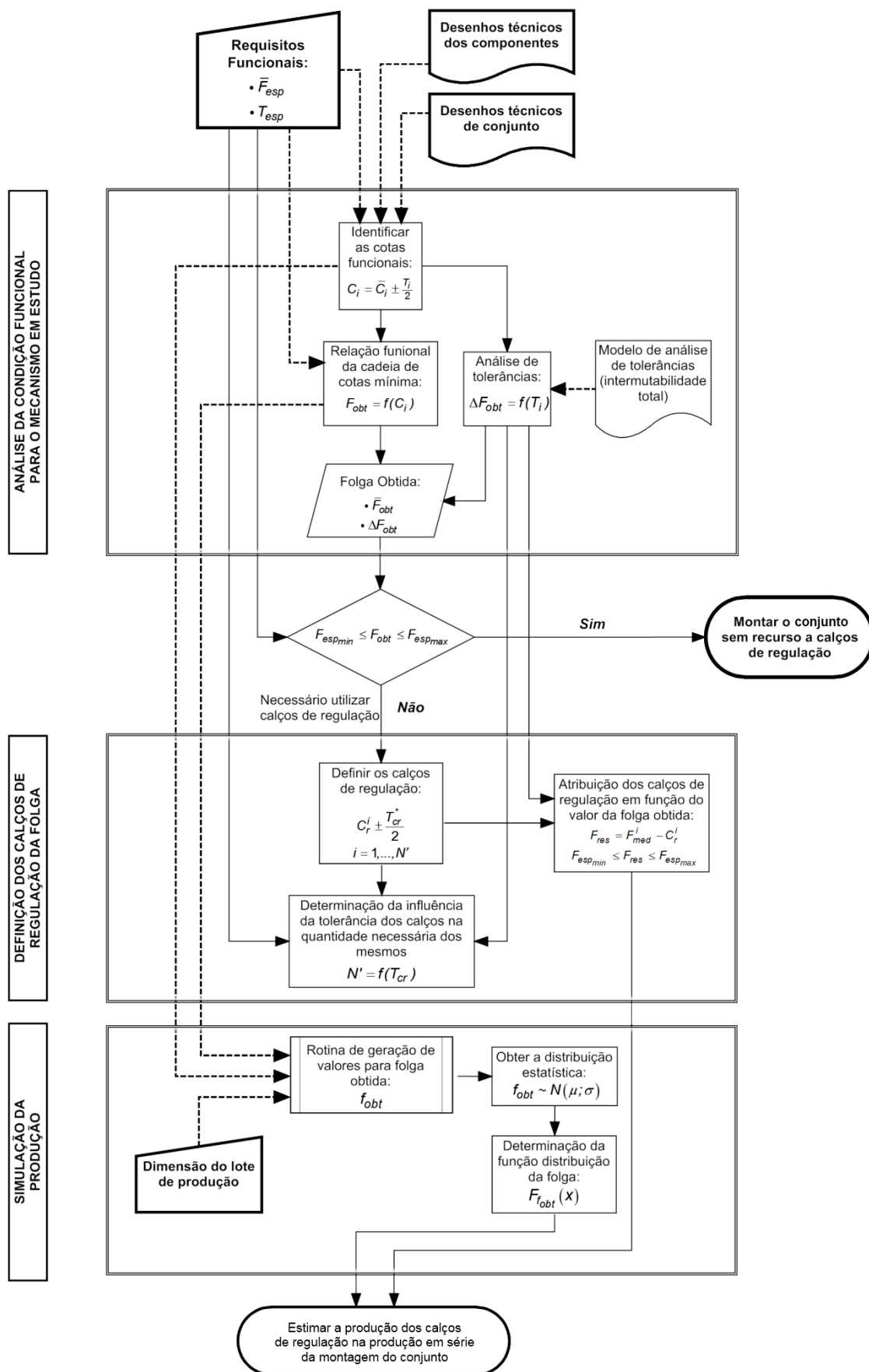


Figura 4.4 – Fluxograma do trabalho desenvolvido no caso de estudo

4.3 Análise da condição funcional do sistema mecânico

4.3.1 Cadeia mínima de cotas funcionais do conjunto

Como foi constatado em § 3, o dimensionamento dos calços de regulação passa pela análise funcional do sistema mecânico.

No projecto, para obter o valor da folga resultante da montagem do conjunto, é necessário analisar o conjunto funcional sem o calço de regulação, e identificar a respectiva cadeia mínima de cotas funcionais como mostra a Figura 4.5.

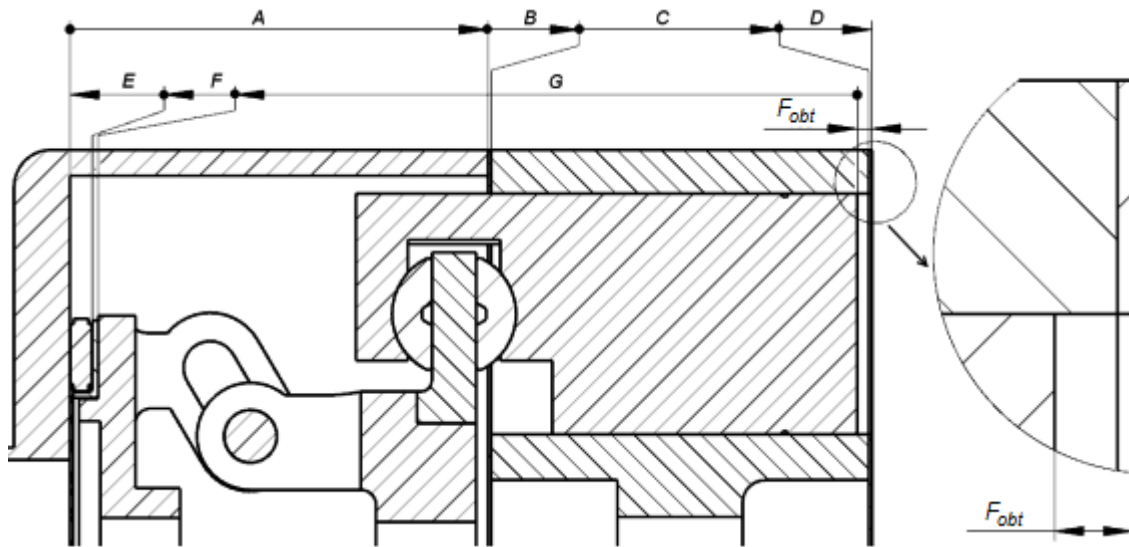


Figura 4.5 – Cadeia mínima de cotas funcionais para o conjunto funcional sem o calço de regulação (tirado do Anexo A.3)

A cadeia mínima de cotas funcionais foi estabelecida através das superfícies funcionais do conjunto, seguindo a metodologia enunciada em § 2.3, exceptuando para a cota funcional G, respeitante ao mecanismo de transformação do movimento circular do prato oscilante em movimento alternativo dos pistões - identificado na Figura 4.1, que devido aos ajustamentos que este possui necessita de uma análise pormenorizada.

A relação funcional da cadeia mínima de cotas funcionais para este conjunto, dada pela equação (2.1), resulta:

$$F_{obt} = (A + B + C + D) - (E + F + G) \quad (4.1)$$

4.3.2 Identificação das cotas funcionais dos componentes

As cotas funcionais são identificadas através dos desenhos técnicos dos componentes do sistema mecânico, que se encontram em anexo. Para a análise que se segue, todas as cotas são representadas pelos seus valores médios.

- **Cota Funcional A**

A cota funcional A é respeitante ao componente cárter (Figura 4.6).

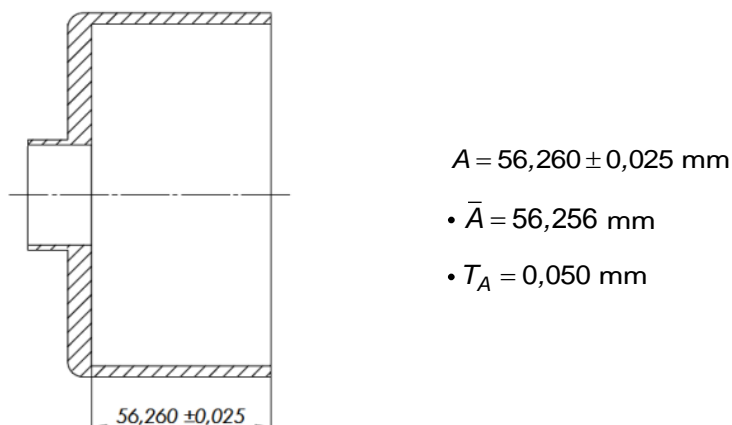


Figura 4.6 – Cota funcional A (tirado do Anexo A.4)

- **Cota Funcional B**

A cota funcional B é respeitante ao componente junta do cárter (Figura 4.7).

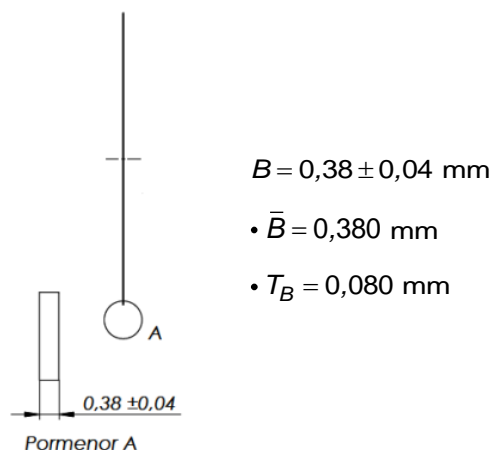


Figura 4.7 – Cota funcional B (tirado do Anexo A.5)

- **Cota Funcional C**

A cota funcional C é respeitante ao componente bloco (Figura 4.8).

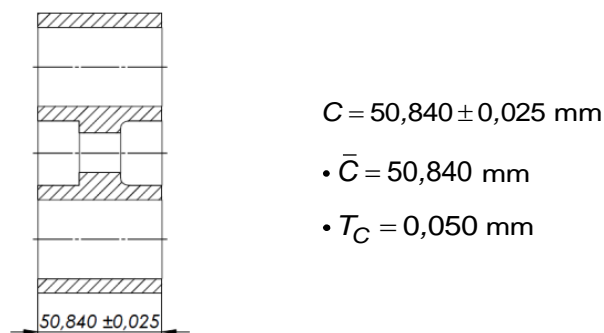


Figura 4.8 – Cota funcional C (tirado do Anexo A.6)

- **Cota Funcional D**

A cota funcional D é respeitante ao componente junta da cabeça (Figura 4.9).

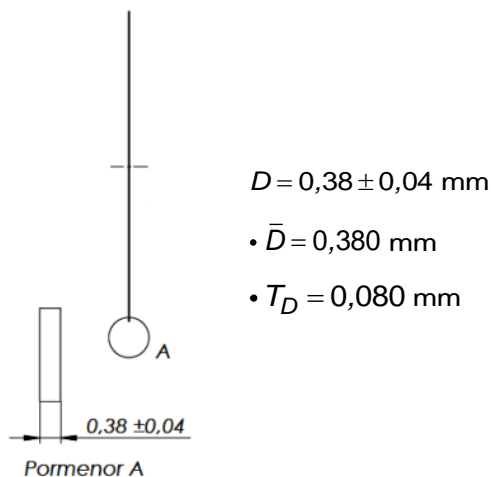


Figura 4.9 – Cota funcional D (tirado do Anexo A.7)

- **Cota Funcional E**

A cota funcional E é respeitante ao componente porta rolos (Figura 4.10).

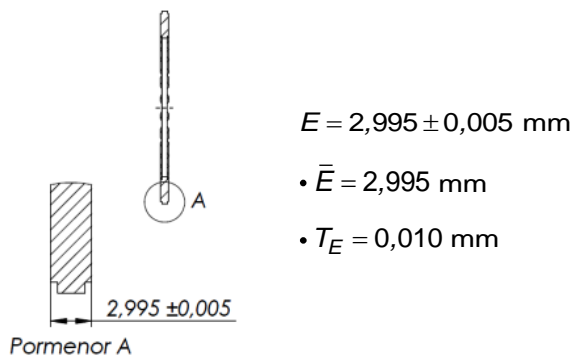


Figura 4.10 – Cota funcional E (tirado do Anexo A.8)

- **Cota Funcional F**

A cota funcional F é respeitante ao componente anel do porta rolos (Figura 4.11).

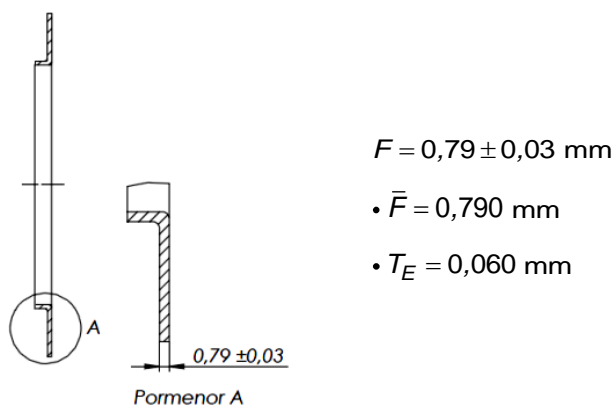


Figura 4.11 – Cota funcional F (tirado do Anexo A.9)

- **Cota Funcional G**

A cota funcional G é respeitante ao mecanismo de transformação do movimento, composto pelos componentes: rotor, cavilha cilíndrica, cubo, prato oscilante, chavetas esféricas e pistão.

Devido aos ajustamentos existentes neste mecanismo (ajustamento rotor – cavilha cilíndrica – cubo; e ajustamento prato oscilante – chavetas esféricas – pistão), a cota parcial será distribuída pelas cotas mostradas na Figura 4.12.

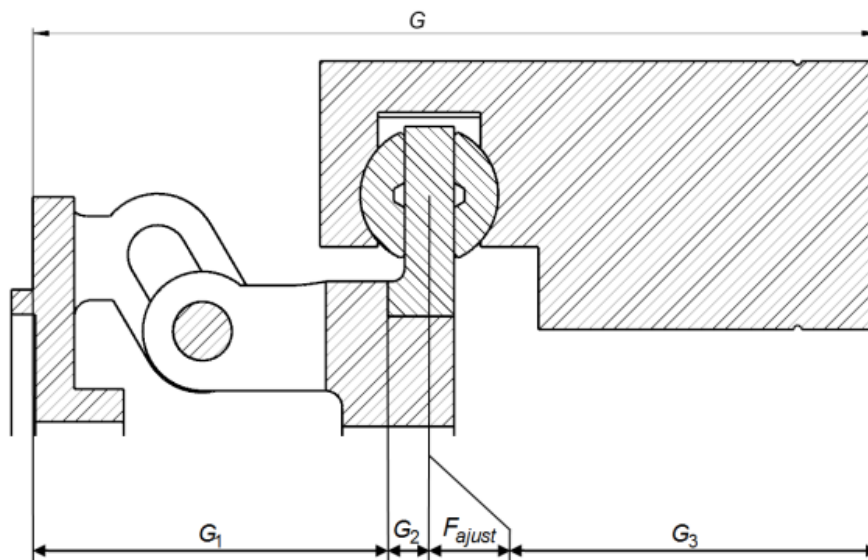


Figura 4.12 – Cota funcional G do mecanismo de transformação de movimento

A cota G é dada pela equação (4.2).

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + F_{ajust} \quad (4.2)$$

A cota G_1 é composta pelos componentes que contêm o ajustamento rotor – cavilha cilíndrica – cubo (Figura 4.13).

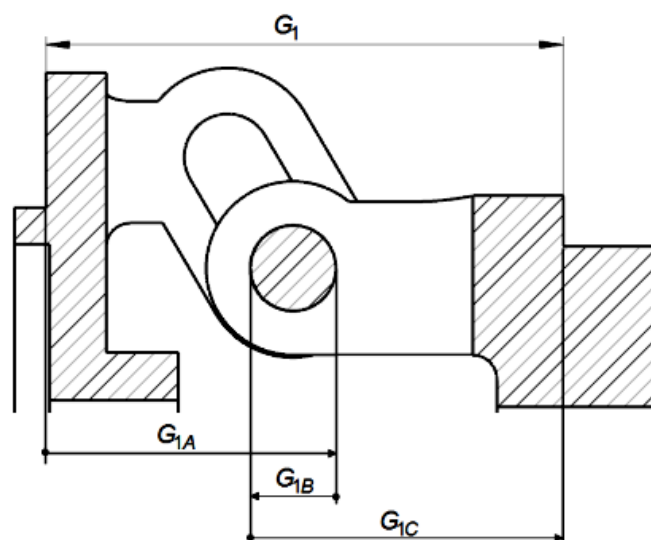


Figura 4.13 – Cota G_1 que contém o ajustamento rotor – cavilha cilíndrica – cubo

A cota G_1 é dada pela equação (4.3).

$$G_1 = G_{1A} - G_{1B} + G_{1C} \quad (4.3)$$

A cota funcional G_{1A} é respeitante ao componente rotor (Figura 4.14).

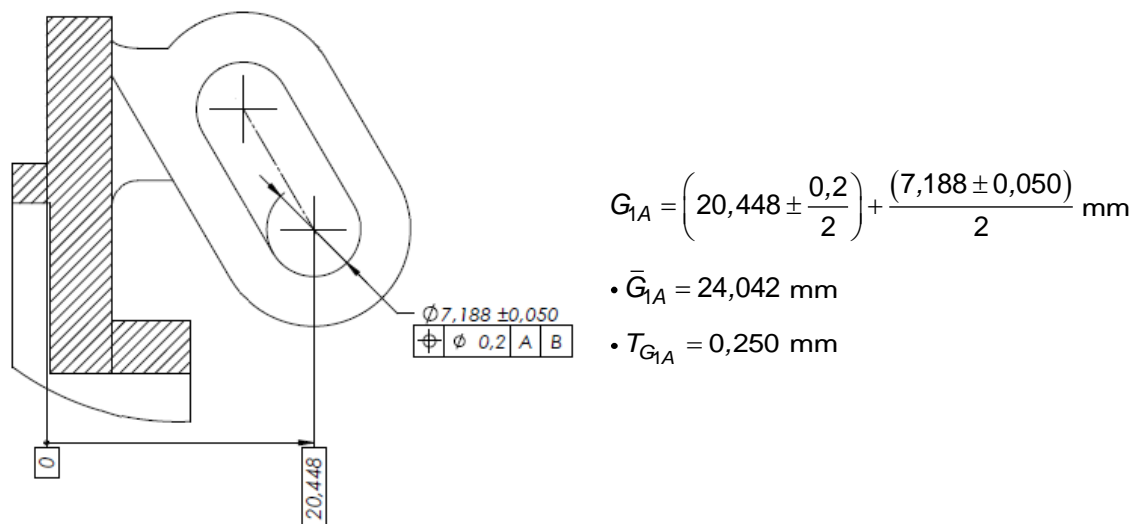


Figura 4.14 – Cota funcional G_{1A} (tirado do Anexo A.10)

A cota funcional G_{1B} é respeitante ao componente cavilha cilíndrica (Figura 4.15).

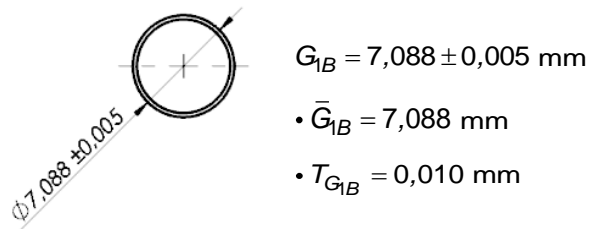


Figura 4.15 – Cota funcional G_{1B} (tirado do Anexo A.11)

A cota funcional G_{1C} é respeitante ao componente cubo (Figura 4.16).

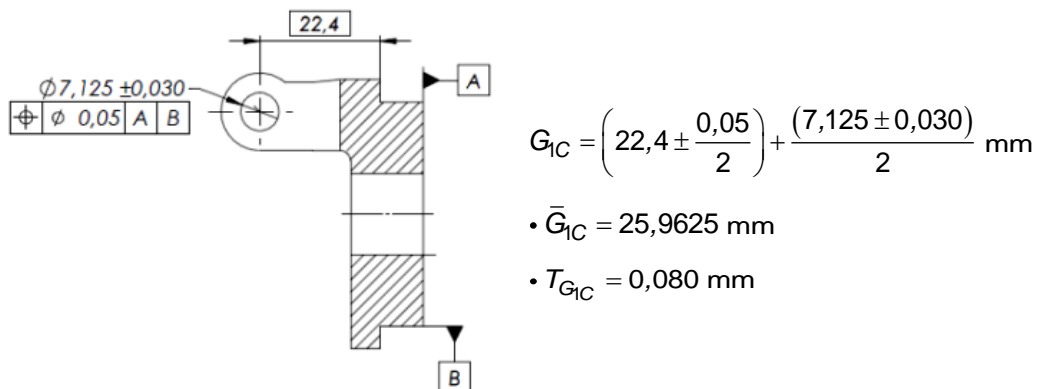


Figura 4.16 – Cota funcional G_{1C} (tirado do Anexo A.12)

A cota funcional G_2 é respeitante ao componente prato oscilante (Figura 4.17).

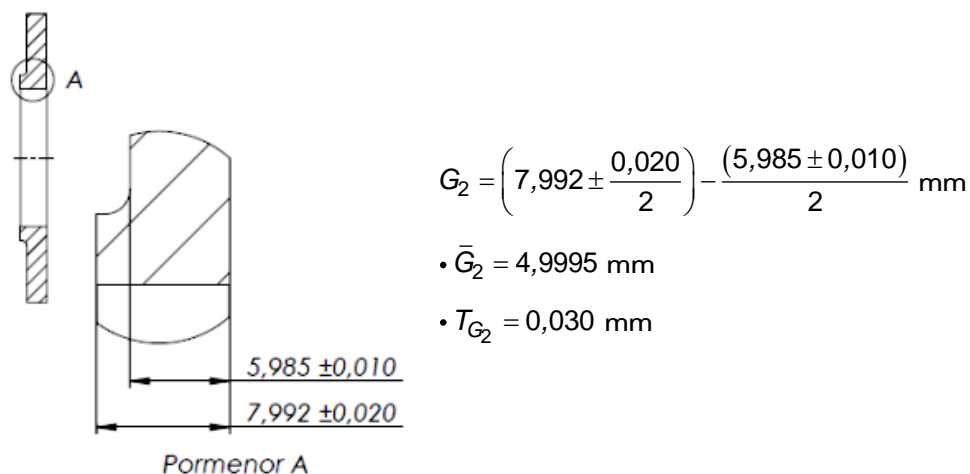


Figura 4.17 – Cota funcional G_2 (tirado do Anexo A.13)

A cota funcional G_3 é respeitante ao componente pistão (Figura 4.18).

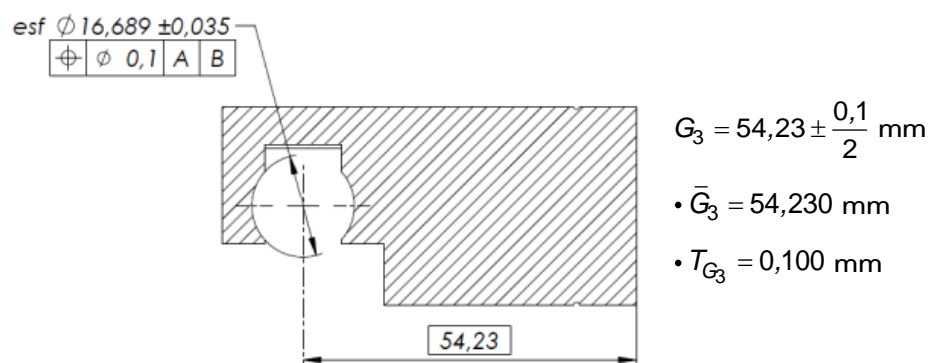


Figura 4.18 – Cota funcional G_3 (tirado do Anexo A.14)

A folga F_{ajust} diz respeito ao ajustamento pistão - chavetas esféricas - prato oscilante (Figura 4.19).

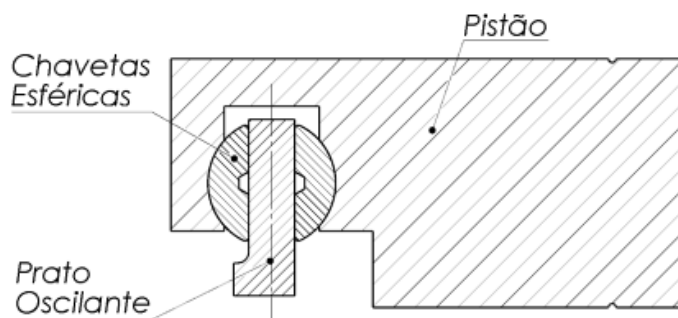


Figura 4.19 – Ajustamento pistão – chavetas esféricas – prato oscilante

A tolerância da folga do ajustamento pistão – chavetas esféricas – prato oscilante, $T_{F_{ajust}}$, influenciará a posição relativa do eixo da cavidade esférica do pistão face ao eixo de simetria das superfícies de contacto do prato oscilante, afectando a cota funcional G .

A Figura 4.20 mostra o desvio de posição entre os eixos referidos neste ajustamento.

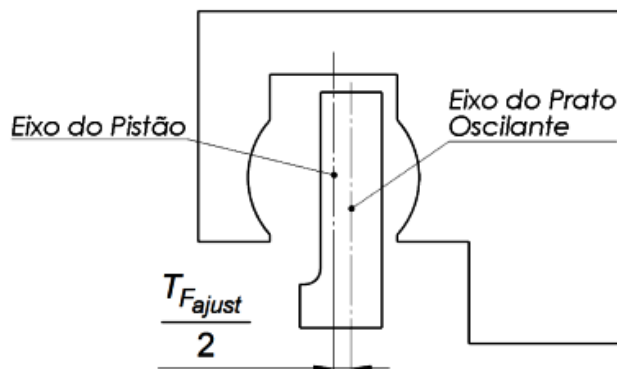


Figura 4.20 – Influência da tolerância da folga, $T_{F_{ajust}}$, no desvio de posição entre o eixo da cavidade esférica do pistão e o eixo de simetria das superfícies de contacto do prato oscilante

É necessário calcular $T_{F_{ajust}}$ para saber o valor do possível desvio de posição no ajustamento.

A Figura 4.21 mostra a cadeia mínima de cotas para o cálculo da folga F_{ajust} .

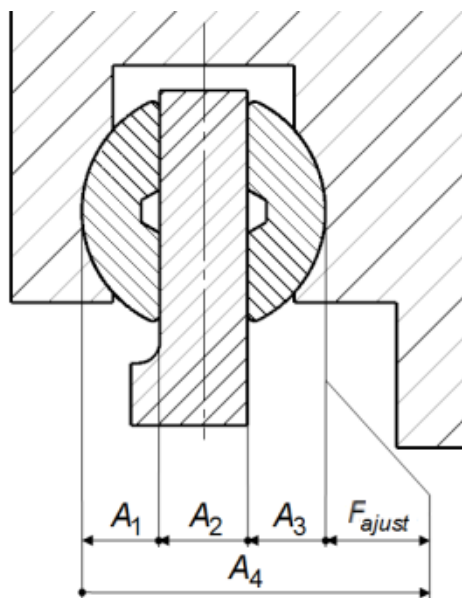
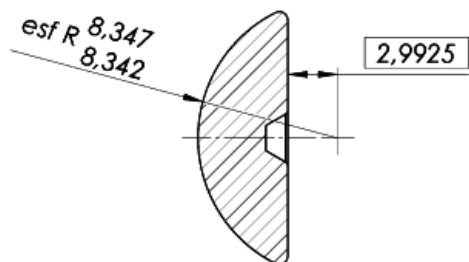


Figura 4.21 – Cadeia mínima de cotas para a folga do ajustamento, F_{ajust} , entre o pistão, as chavetas esféricas e o prato oscilante

A folga F_{ajust} é dada pela equação (4.4).

$$F_{ajust} = A_4 - (A_1 + A_2 + A_3) \quad (4.4)$$

As cotas funcionais A_1 e A_3 são respeitantes aos componente chavetas esféricas (Figura 4.22).



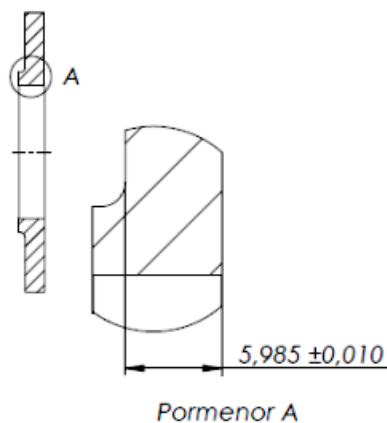
$$A_1 = A_3 = (8,3345 \pm 0,0025) - 2,9925 \text{ mm}$$

$$\bullet \bar{A}_1 = \bar{A}_3 = 5,352 \text{ mm}$$

$$\bullet T_{A_1} = T_{A_3} = 0,005 \text{ mm}$$

Figura 4.22 – Cotas funcionais A_1 e A_3 (tirado o do Anexo A.15)

A cota funcional A_2 corresponde à dimensão entre as superfícies de contacto do prato oscilante no ajustamento (Figura 4.23).



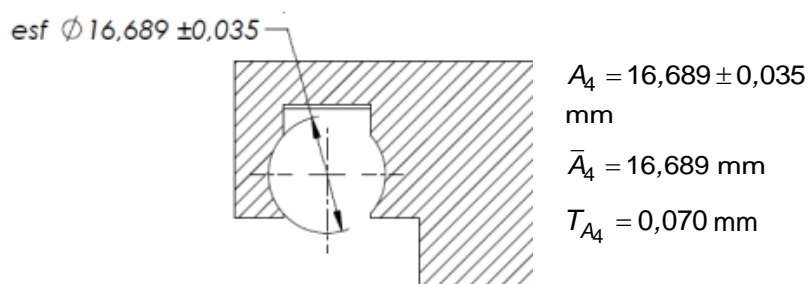
$$A_2 = 5,985 \pm 0,010 \text{ mm}$$

$$\bullet \bar{A}_2 = 5,985 \text{ mm}$$

$$\bullet T_{A_2} = 0,020 \text{ mm}$$

Figura 4.23 – Cota funcional A_2 (tirado do Anexo A.13)

A cota funcional A_4 corresponde à dimensão da cavidade esférica do pistão (Figura 4.24).



$$A_4 = 16,689 \pm 0,035 \text{ mm}$$

$$\bar{A}_4 = 16,689 \text{ mm}$$

$$T_{A_4} = 0,070 \text{ mm}$$

Figura 4.24 – Cota funcional A_4 (tirado do Anexo A.14)

• **Folga F_{obt}**

A cota nominal da folga F_{obt} resulta adicionando à equação (4.1) os resultados das equações (4.2), (4.3) e (4.4):

$$F_{obt} = (A + B + C + D + G_{1B} + A_1 + A_2 + A_3) - (E + F + G_{1A} + G_{1C} + G_2 + G_3 + A_4) \quad (4.5)$$

A variação da folga obtida na montagem respeita o modelo da intermutabilidade total enunciado em § 2.4, ou seja, será a soma das tolerâncias das 15 cotas funcionais identificadas:

$$\Delta F_{obt} = \sum_{i=1}^{15} T_i \quad (4.6)$$

Na Tabela 4.2 resumem-se os valores médios e as respectivas tolerâncias calculados para as 15 cotas funcionais.

Tabela 4.2 – Resumo das cotas funcionais discriminadas para cada componente

Cota Funcional		Componente	Valor Médio [mm]	Tolerância [mm]
A		Cárter	56,260	0,050
B		Junta do cárter	0,380	0,080
C		Bloco	50,840	0,050
D		Junta da cabeça	0,380	0,080
E		Porta rolos	2,995	0,010
F		Anel do porta rolos	0,790	0,060
G	G ₁	G _{1A} Rotor	20,042	0,250
		G _{1B} Cavilha cilíndrica	7,088	0,010
		G _{1C} Cubo	28,9625	0,080
	G ₂	Prato oscilante	4,9995	0,030
	G ₃	Pistão	54,230	0,100
	F _{ajust}	A ₁ Chaveta esférica	5,352	0,005
		A ₂ Prato oscilante	5,985	0,020
		A ₃ Chaveta esférica	5,352	0,005
		A ₄ Pistão	16,689	0,070

Como todas as cotas funcionais se encontram centradas no seu valor médio, o valor nominal da folga e a sua tolerância resultam directamente das equações (4.5) e (4.6), respectivamente:

$$\bar{F}_{obt} = 1,929 \text{ mm} \quad (4.7)$$

$$\Delta F_{obt} = 0,900 \text{ mm} \quad (4.8)$$

Confrontando estes valores com as variações observadas na empresa, foi possível considerar que a origem das variações é efectivamente o toleranciamento indicado no projecto. É também possível constatar a necessidade de calços, uma vez que os valores obtidos são superiores aos especificados.

4.4 Definição dos calços de regulação das folgas para o caso de estudo

Confrontados os resultados obtidos para a folga na análise funcional com os especificados, tem-se que:

$$\begin{aligned} F_{obt} &\notin [F_{espmin}; F_{espmax}] \\ T_{esp} &< \Delta F_{obt} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Para o dimensionamento dos calços de regulação é necessário saber o valor da tolerância dos calços de regulação, T_{cr} .

Da Tabela 4.1 em § 4.1, verifica-se que os calços disponíveis na solução actual têm 0,040 mm como especificação de tolerância. Admite-se então, que os calços são possíveis de produzir com uma tolerância de 0,040mm.

A Tabela 4.3 resume os valores das variáveis necessárias para o dimensionamento dos calços de regulação para o sistema mecânico analisado.

Tabela 4.3 – Variáveis necessárias para o dimensionamento dos calços de regulação

Variáveis	Valor [mm]
\bar{F}_{esp}	0,275
T_{esp}	0,250
\bar{F}_{obt}	1,929
ΔF_{obt}	0,900
T_{cr}	0,040

Na Tabela 4.4 encontra-se o resultado do dimensionamento para os calços de regulação obtido para as variáveis da Tabela 4.3 e utilizando as equações (3.12), (3.13), (3.20) e (3.24), apresentadas em § 3.2.

Tabela 4.4 – Resultado do dimensionamento dos calços de regulação para o sistema mecânico analisado

Quantidade de calços, N'	5
	1,294
	1,474
Cotas funcionais dos N' calços [mm], C_r^i	1,654
	1,834
	2,014
Tolerância óptima dos calços [mm], T_{cr}^*	0,070

Substituindo os resultados obtidos no dimensionamento dos calços de regulação na Tabela 3.1 formulada em § 3, chega-se à Tabela 4.5, que permite relacionar a dimensão da folga medida na montagem do conjunto com o calço a utilizar para cumprir a folga especificada.

Tabela 4.5 – Relação entre a folga medida na montagem e o calço de regulação a utilizar

Calço de regulação, i	Folga medida [mm], F_{med}^i	Cota funcional do calço [mm], C_r^i
# 1	[1,479 ; 1,659[$1,294 \pm 0,035$
# 2	[1,659 ; 1,839[$1,474 \pm 0,035$
# 3	[1,839 ; 2,019[$1,654 \pm 0,035$
# 4	[2,019 ; 2,199[$1,834 \pm 0,035$
# 5	[2,199 ; 2,379]	$2,014 \pm 0,035$

No Anexo A.16 encontra-se o desenho técnico dos calços de regulação baseado na Tabela 4.5.

Seguidamente, analisou-se a influência da tolerância dos calços adoptada inicialmente, T_{cr} , na quantidade necessária de calços, N' . Para o sistema mecânico analisado, a quantidade de calços de regulação, dada pela equação (3.12), vem:

$$N' = f(T_{cr}) = \left\lceil \frac{0,900}{0,250 - T_{cr}} \right\rceil \quad (4.10)$$

O gráfico da Figura 4.25, mostra a quantidade de calços em função da tolerância dos mesmos, de acordo com a expressão (4.10).

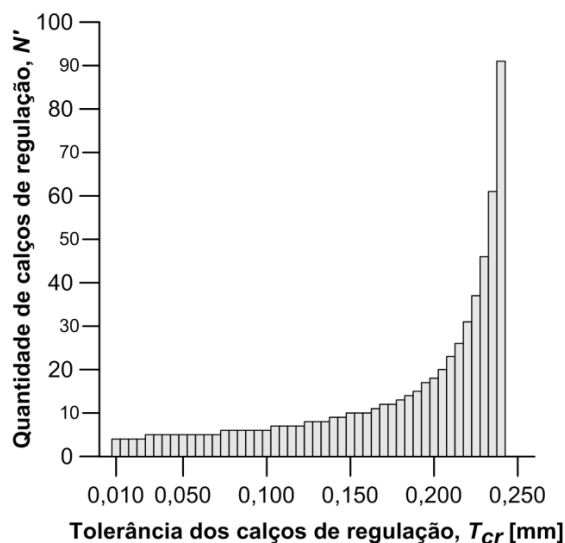


Figura 4.25 – Relação da tolerância, T_{cr} , com a quantidade necessária de calços, N'

4.5 Simulação da produção - estimativa da utilização dos calços de regulação

Com o intuito de estimar a percentagem de utilização dos calços definidos em § 4.4, simulou-se uma amostra de resultados possíveis para a folga F_{obt} , para a situação de produção em série do sistema mecânico.

Como não são conhecidas as distribuições estatísticas das diferentes cotas funcionais calculadas em § 4.3.2, considerou-se que estas são variáveis aleatórias absolutamente contínuas de distribuição uniforme, isto é, para cada cota funcional C_i (identificada na Tabela 4.2 em § 4.3.2) de valor nominal médio \bar{C}_i e tolerância T_i , a correspondente variável aleatória c_i terá distribuição uniforme no intervalo $\left[\bar{C}_i - \frac{T_i}{2}; \bar{C}_i + \frac{T_i}{2}\right]$ e representa-se por:

$$c_i \sim U(C_{min_i}, C_{max_i}) \quad (4.11)$$

A amostra é composta por valores gerados para a folga F_{obt} , através da variável aleatória f_{obt} , e que obter-se-á através da equação (4.5), sendo portanto função das 15 cotas funcionais geradas aleatoriamente.

O fluxograma da Figura 4.26 ilustra a rotina de simulação numérica utilizada para a geração da amostra de valores para a folga $f_{obt}^{(d)}$.

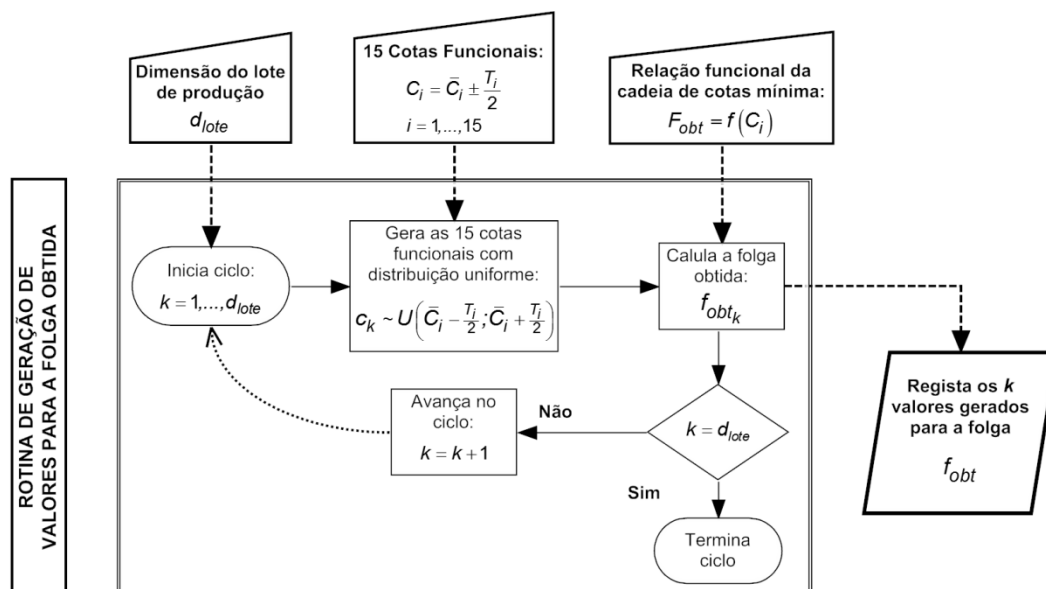


Figura 4.26 – Fluxograma da rotina de geração de valores para a folga f_{obt}

^(d) No Anexo B encontra-se o código em linguagem *Matlab*[®] da rotina de simulação numérica para a geração da amostra.

Na Figura 4.27 está representado o histograma de frequências dos resultados gerados para a folga f_{obt} numa amostra representativa da produção de 1000 produtos.

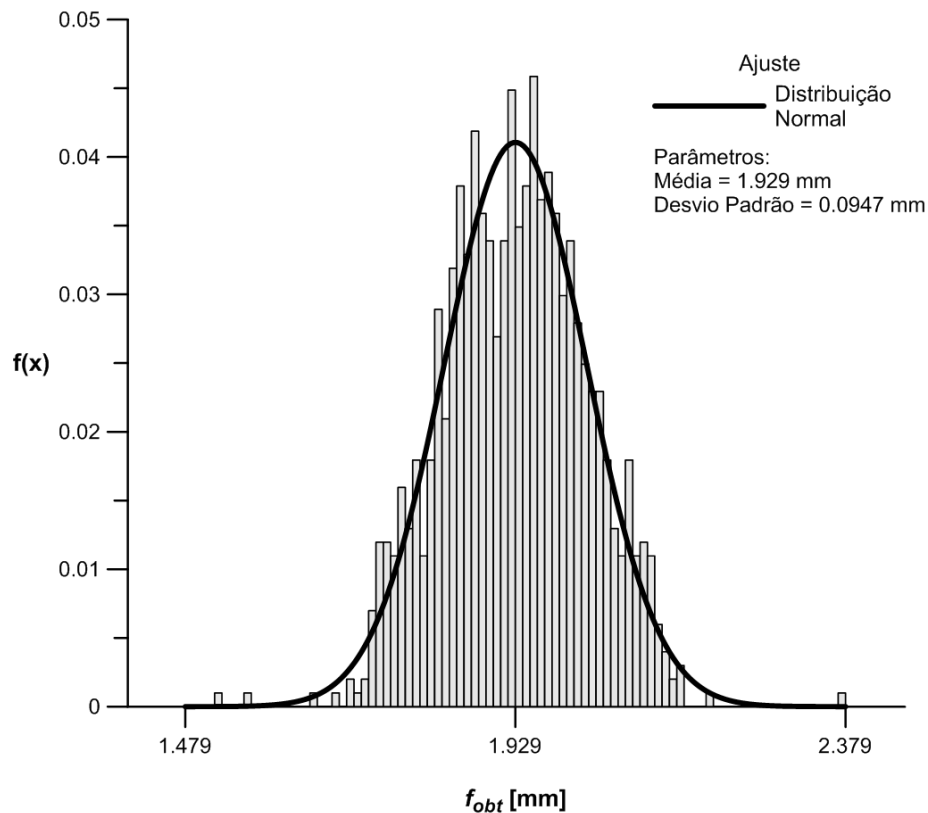


Figura 4.27 – Histograma de frequências dos 1000 valores gerados para a f_{obt} .

Verifica-se que a f_{obt} apresenta uma dispersão estatística que se ajusta a uma distribuição normal de parâmetros $N(\mu; \sigma)$:

- Valor Médio: $\mu = 1,979$ mm;
- Desvio-Padrão: $\sigma = 0,095$ mm.

Estes resultados levam a considerar a folga resultante da montagem do sistema mecânico como sendo uma variável aleatória absolutamente contínua de distribuição normal, e escreve-se de modo abreviado:

$$f_{obt} \sim N(1,929 ; 0,095) \quad (4.12)$$

Uma vez conhecida a distribuição estatística da folga f_{obt} , e sendo esta do tipo normal, é possível estimar a percentagem de utilização dos calços de regulação na produção de determinada quantidade de conjuntos, através da função de distribuição da folga, $F_{f_{obt}}(x)$.

A função $F_{f_{obt}}(x)$ é expressa pela equação (4.13) ^(e).

$$F_{f_{obt}}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{0,095 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-1,929}{0,095} \right)^2} dt \quad (4.13)$$

Na Figura 4.28 encontra-se representada a função $F_{f_{obt}}(x)$.

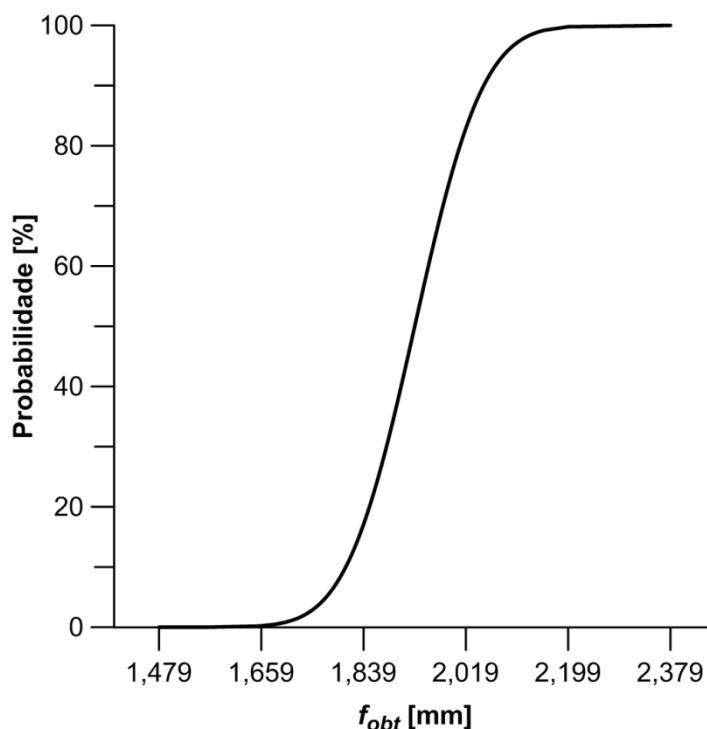


Figura 4.28 – Função distribuição de f_{obt}

A probabilidade do valor da folga f_{obt} estar compreendido no intervalo $[a;b]$, é dada pela expressão:

$$P(a \leq f_{obt} \leq b) = F_{f_{obt}}(b) - F_{f_{obt}}(a) \quad (4.14)$$

A utilização de cada calço de regulação é determinada pelo respectivo intervalo de folga medido, definido na Tabela 4.5. Portanto, a probabilidade de utilizar um determinado tipo de calço de regulação é igual à probabilidade de ocorrência do respectivo intervalo de folga.

^(e) A determinação da expressão para a função $F_{f_{obt}}(x)$ encontra-se no Anexo C.

Através da expressão (4.14) e atendendo aos resultados da Tabela 4.5, elaborou-se a Tabela 4.6 que estima a probabilidade de utilização de cada um dos 5 calços em função da quantidade de sistemas mecânicos produzidos.

Tabela 4.6 – Probabilidade de utilização de cada um dos 5 calços

Calço de Regulação	Intervalo correspondente de f_{obt} , $[a; b]$	Probabilidade de ocorrência [%] $F_{i_{obt}}(b) - F_{i_{obt}}(a)$
# 1	$[1,479 ; 1,659[$	0,2
# 2	$[1,659 ; 1,839[$	16,9
# 3	$[1,839 ; 2,019[$	65,8
# 4	$[2,019 ; 2,199[$	16,9
# 5	$[2,199 ; 2,379]$	0,2

A Tabela 4.6 é representativa da solução proposta, permitindo saber qual a quantidade dos calços de regulação por espessura, a fim de poderem ser introduzidos na linha de montagem do sistema mecânico e, assim, automatizar o seu processo de montagem.

5 Conclusões

Na presente dissertação, foram tiradas as seguintes conclusões:

- ✓ A partir da formulação analítica e geométrica evidenciou-se que a definição dos calços de regulação depende de cinco variáveis que servem de *input* à metodologia, nomeadamente: o valor médio da folga obtida na análise funcional, a variação possível dos valores da folga obtida (com a montagem sem o calço), a folga especificada no projecto para o conjunto funcional, a tolerância da folga especificada e a tolerância de fabrico dos calços;
- ✓ É possível otimizar o valor da tolerância da cota funcional dos calços para um dado número destes;
- ✓ A obtenção de uma relação entre a classe de folga da montagem e um calço de regulação permite a selecção determinística dum calço em concreto para cada conjunto montado;
- ✓ É possível aumentar a tolerância dos calços, porém a quantidade destes aumenta hiperbolicamente com o incremento desta tolerância;
- ✓ Da simulação de produção é possível estimar as quantidades de calços a utilizar em séries produtivas;
- ✓ Da selecção determinística do calço e da simulação de produção é possível automatizar o processo de ajuste da folga funcional de cada conjunto;
- ✓ Para o caso de estudo é possível garantir a folga especificada apenas com 5 calços de regulação com tolerância de 0,070 mm, em alternativa aos 13 com tolerância de 0,040 mm actualmente usados. Todavia, é de admitir que possa haver alguma influência proveniente de desvios geométricos dos componentes da montagem, os quais possam provocar um aumento da folga e consequentemente do número de calços;
- ✓ A metodologia desenvolvida pode ser utilizada como um auxiliar em tomadas de decisão por equipas de engenharia simultânea com vista a encontrarem de forma objectiva uma solução racional para uma montagem.

Finalmente, a análise de influência de desvios geométricos na variação dimensional da folga parece constituir uma sugestão pertinente para dar continuidade a este trabalho, no que à resolução do caso em concreto diz respeito.

Bibliografia

- Bakerjian, R. (1992) *Tool and manufacturing: Engineers Book*, Society for Manufacturing Engineers. Dearborn, Michigan. ISBN: 0872630854
- Campbell, R. G.e Roth, E. S. (2003) *Integrated Product Design and Manufacturing Using Geometric Dimensioning and Tolerancing*, New York - Basel: Marcel Dekker, Inc.
- Chiabert, P., Lombardi, F.e Orlando, M. (1998) 'Benefits of Geometric Dimensioning and Tolerancing', *Journal of Materials Processing Technology*, 78(1–3), 29-35.
- Cogorno, G. (2006) *Geometric Dimensioning and Tolerancing for Mechanical Design*, McGraw-Hill Prof Med/Tech. Michigan University. ISBN: 9780071460705
- Cunha, L. V. da. (2004) *Desenho técnico*, 13ª ed., Fundação Calouste Gulbenkian.
- Heilala, J., Vaatainen, O., Salmi, T.e Voho, P. (2002) 'Tolerance Analysis in Assembly of Mechanics for Electronics', *Mechanics for Electronics: Vtt Research Programmed 2000-2002*, 223.
- Henzold, G. (2006) *Geometrical Dimensioning And Tolerancing for Design, Manufacturing And Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards*, 2 ed., Butterworth-Heinemann. ISBN: 9780750667388
- Hochmuth, R., Meerkamm, H.e Schweiger, W. (2000) *An aproach to a general viwe on tolerances in mechanical engineering*, Nuremberg, Germany University Erlangen.
- Hong, Y. S.e Chang, T. C. (2002) 'A comprehensive review of tolerancing research', *International Journal of Production Research*, 40(11).
- Jicey (2007) 'Laminated Peelable Shims', [online], Disponível: http://www.jicey.com/index_gb.htm [Consult. 3 Ago. 2012]
- Montgomery, D. C. (2003) *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*, Livros Técnicos e Científicos. ISBN: 9788521613602
- Mourão, A. (2001) *Calços de regulação: Tipologia, utilização e aplicações. (Exercício da disciplina de Toleranciamento de Sistemas Mecânicos do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da FCT/UNL)*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Apontamentos da disciplina de *Toleranciamento de Sistemas Mecânicos*.
- Mourão, A. (2004a) *Cálculo de Tolerâncias Geométricas*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Apontamentos da disciplina de *Toleranciamento de Sistemas Mecânicos do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da FCT/UNL*.
- Mourão, A. (2004b) *Dimensionamento Funcional e Tecnológico*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, pontamentos da disciplina de *Toleranciamento de Sistemas Mecânicos do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da FCT/UNL*.
- Nielsen, H. S. (2003) 'Communicating Functional Requirements with GD&T', in HN Metrology Consulting, I., ed. Indianapolis, Indiana, USA.
- Nielsen, H. S. (2012) *The ISO Geometrical Product Specifications Handbook - Find your way in GPS*. ISBN: 9788773107218

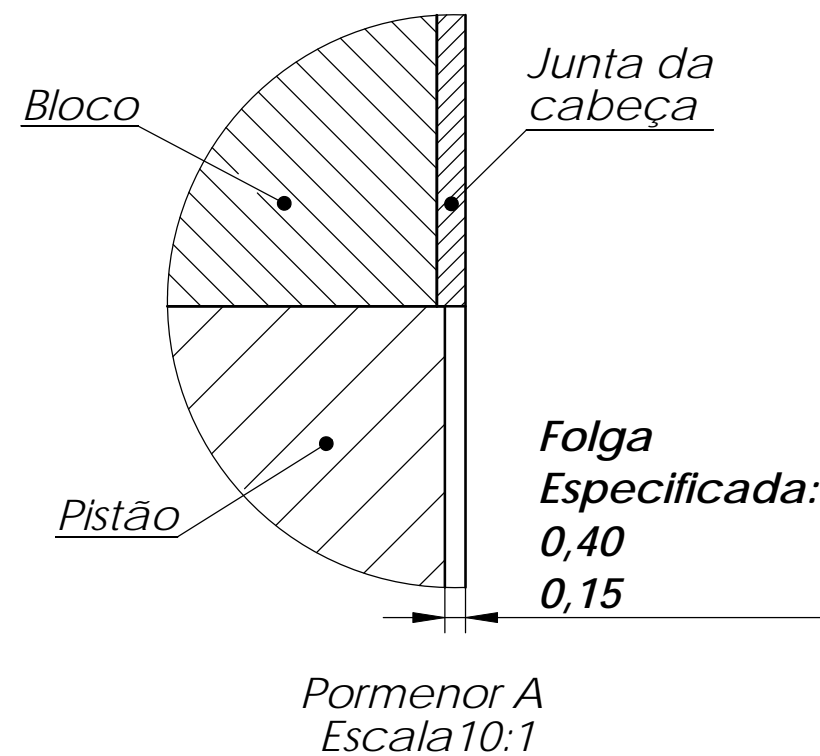
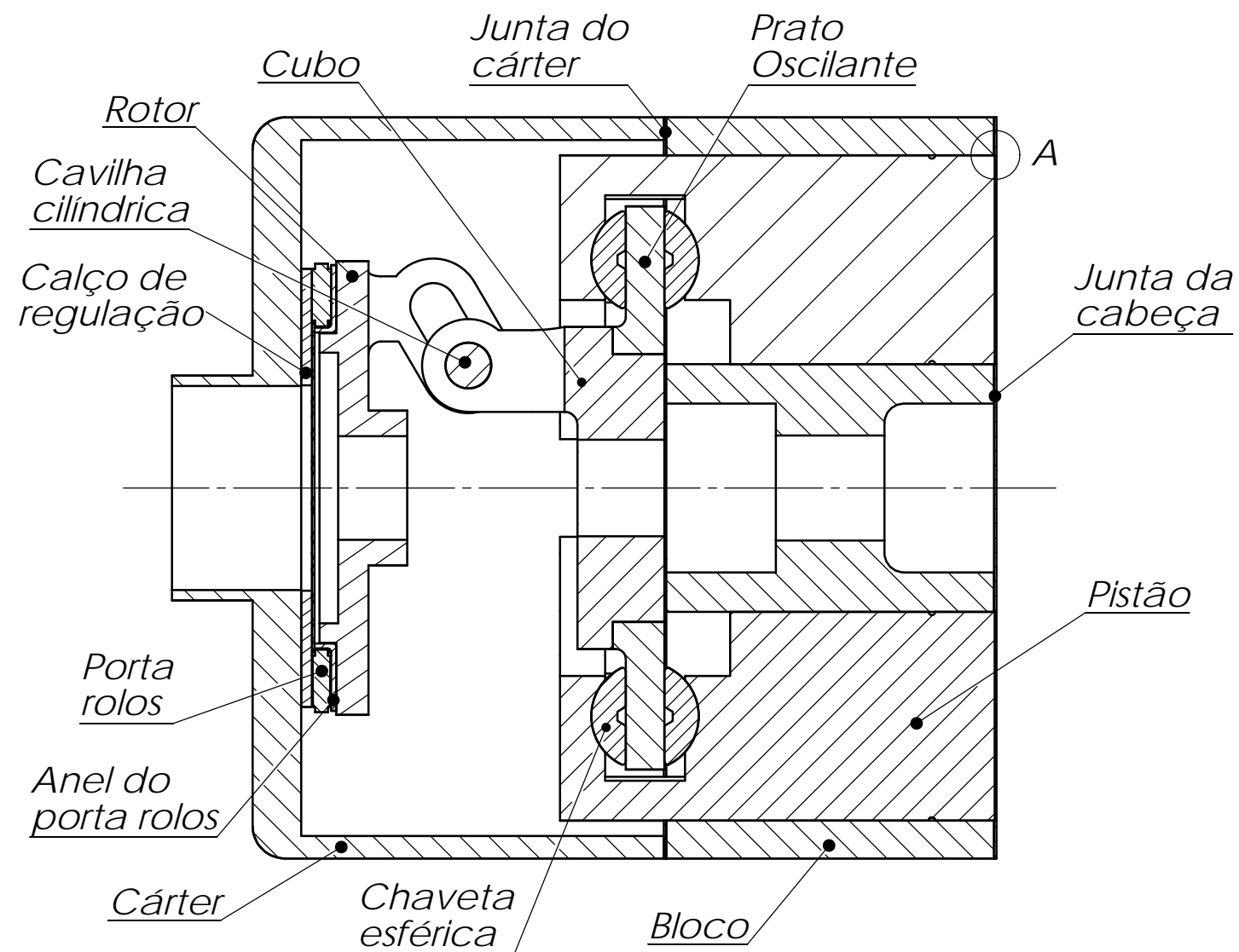
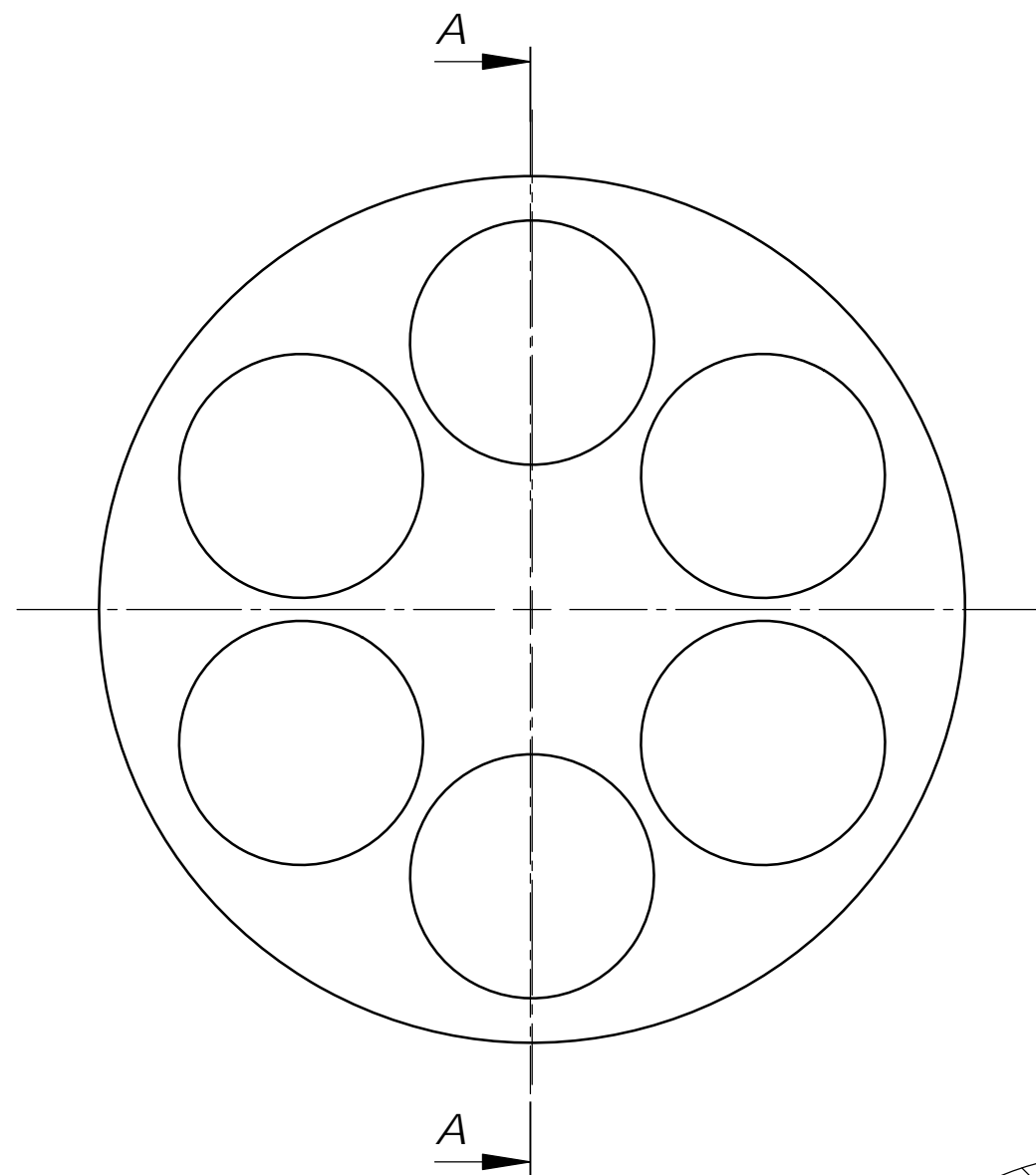
- Perez, R., Ciurana, J., Riba, C., Molina, A., Romero, D., Hernandez, L. W.e Quesada, A. M. (2011) 'Concurrent Conceptual Evaluation of Tolerances' Synthesis in Mechanical Design', *Concurrent Engineering-Research and Applications*, 19(2), 175-186.
- Prusak, Z. (2006) 'Introduction to Global Engineering: Use of Standards and Cultural Differences', in *36th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference*, San Diego, California.
- Requicha, A. A. G. (1983) 'Toward a Theory of Geometric Tolerancing', *International Journal of Robotics Research*, 2(4), 45-60.
- Singh, P. K., Jain, P. K.e Jain, S. C. (2009a) 'Important issues in tolerance design of mechanical assemblies. Part 1: tolerance analysis', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 223(10), 1225-1247.
- Singh, P. K., Jain, P. K.e Jain, S. C. (2009b) 'Important issues in tolerance design of mechanical assemblies. Part 2: tolerance synthesis', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 223(10), 1249-1287.
- Spirol (2009) 'Laminated Shim', [online],Disponível: <http://www.spirol.com/> [Consult. 3 Ago. 2012]
- Spotts, M. F. (1973) 'Allocation of Tolerances to Minimize Cost of Assembly', *Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME*, 95(3), 762-764.
- Umaras, E. (2010) *Tolerâncias dimensionais em conjuntos mecânicos: Estudo e proposta para otimização.*, Tese de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Anexo A: Desenhos Técnicos

Este anexo contém todos os desenhos técnicos que servem de suporte a esta dissertação, obtidos através do *software* de CAD *Solidworks*®.

Tabela A – Desenhos técnicos

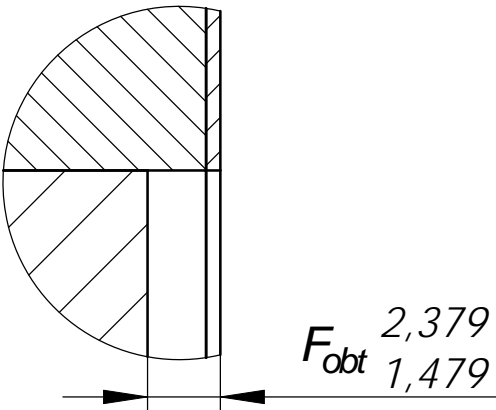
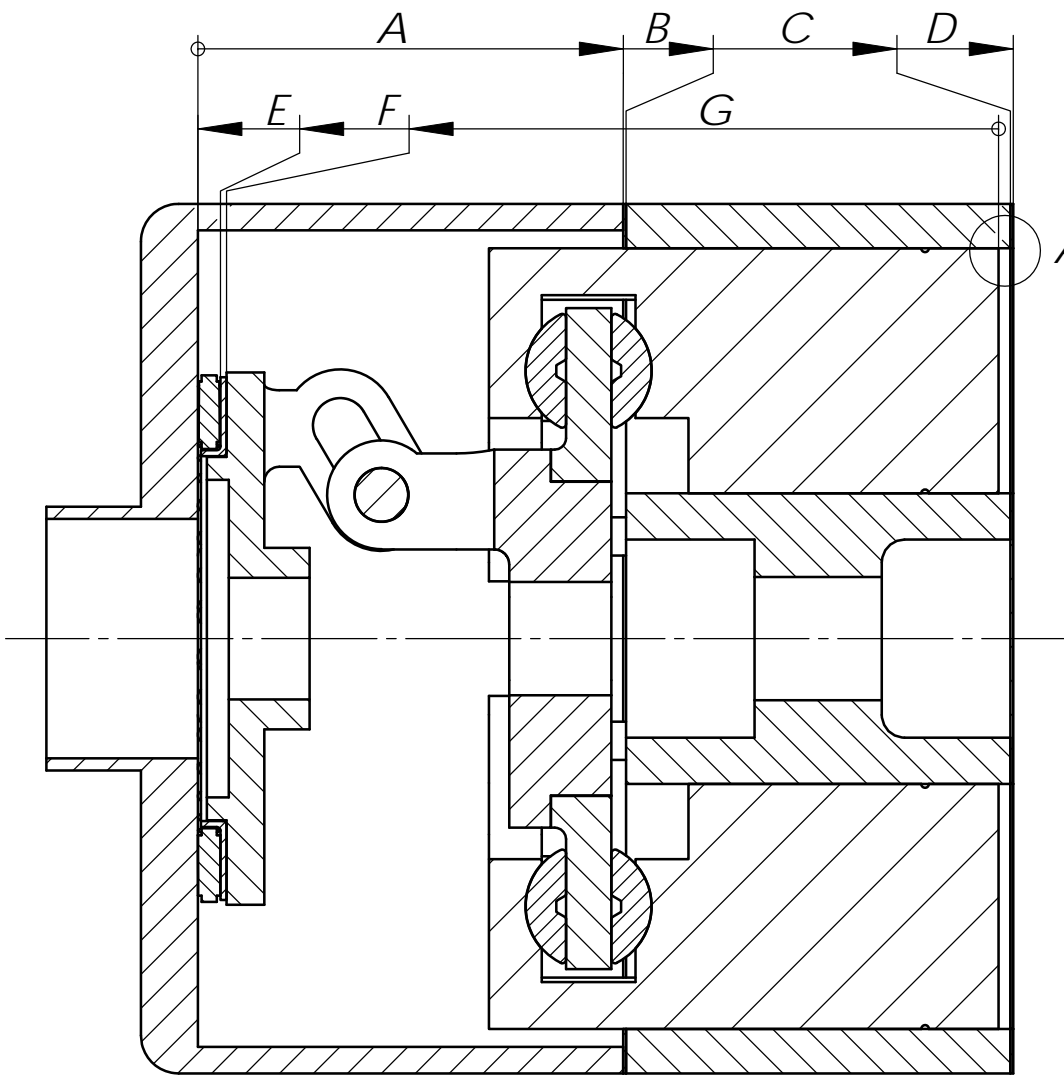
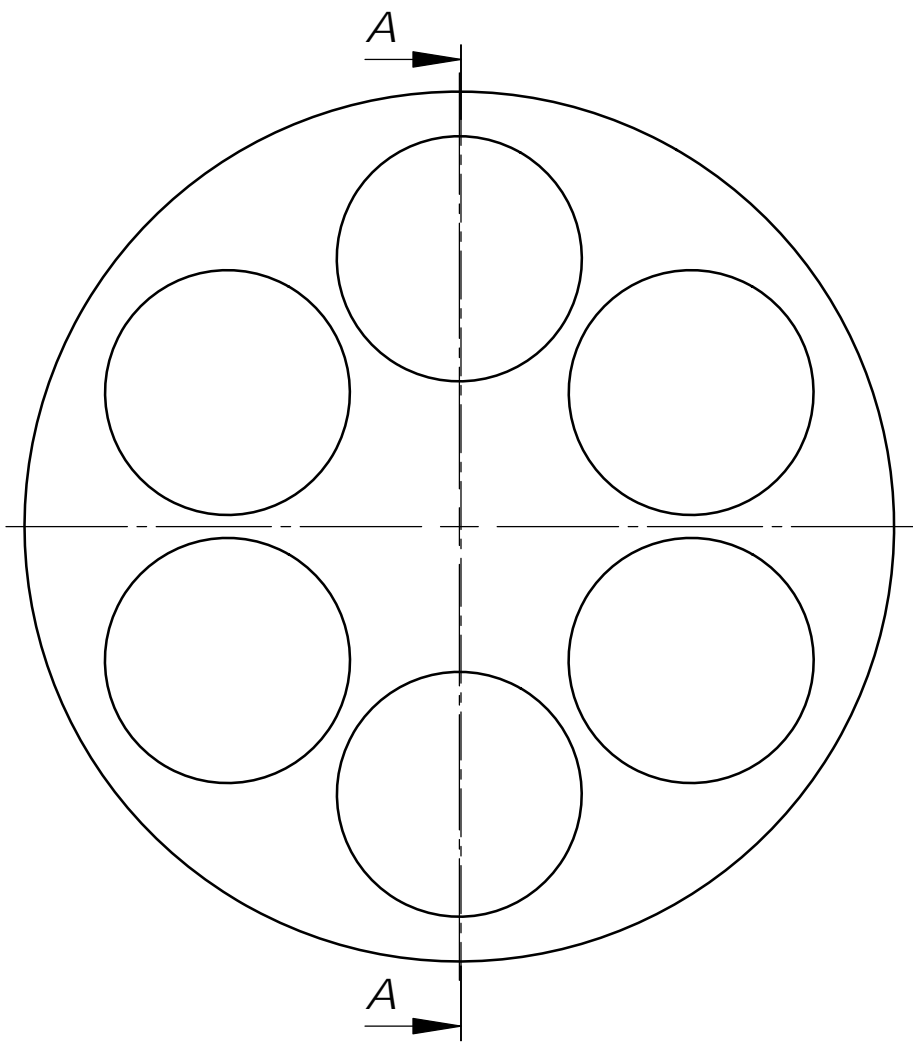
Anexo	Desenho	Página
A.1	Vista explodida do conjunto funcional	47
A.2	Conjunto funcional	49
A.3	Conjunto funcional sem o calço de regulação da folga	51
A.4	Cárter	53
A.5	Junta do cárter	55
A.6	Bloco	57
A.7	Junta da cabeça	59
A.8	Porta rolos	61
A.9	Anel do porta rolos	63
A.10	Rotor	65
A.11	Cavilha cilíndrica	67
A.12	Cubo	69
A.13	Prato oscilante	71
A.14	Pistão	73
A.15	Chaveta esférica	75
A.16	Calços de regulação da folga	77



Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte	Folga especificada para o conjunto funcional obtida através do calço de regulação	FCT/UNL
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte		
Copiou				
Visto				
Escalas	1:1		Conjunto funcional	A.2
	10:1			
Toleran.				
-				

Cadeia Mínima de Cotas Funcionais:

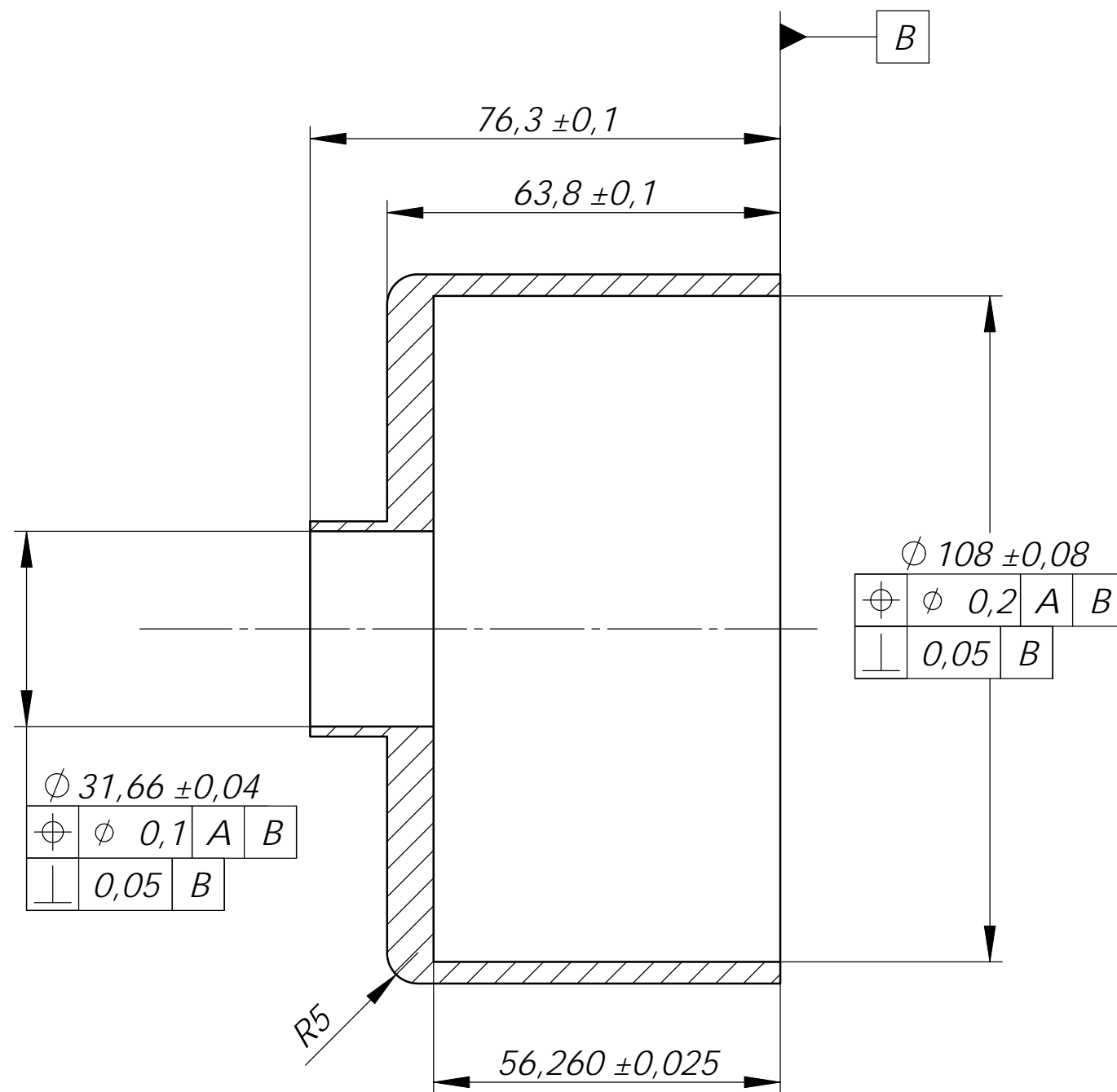
$F_{obt} = (A + B + C + D) - (E + F + G)$



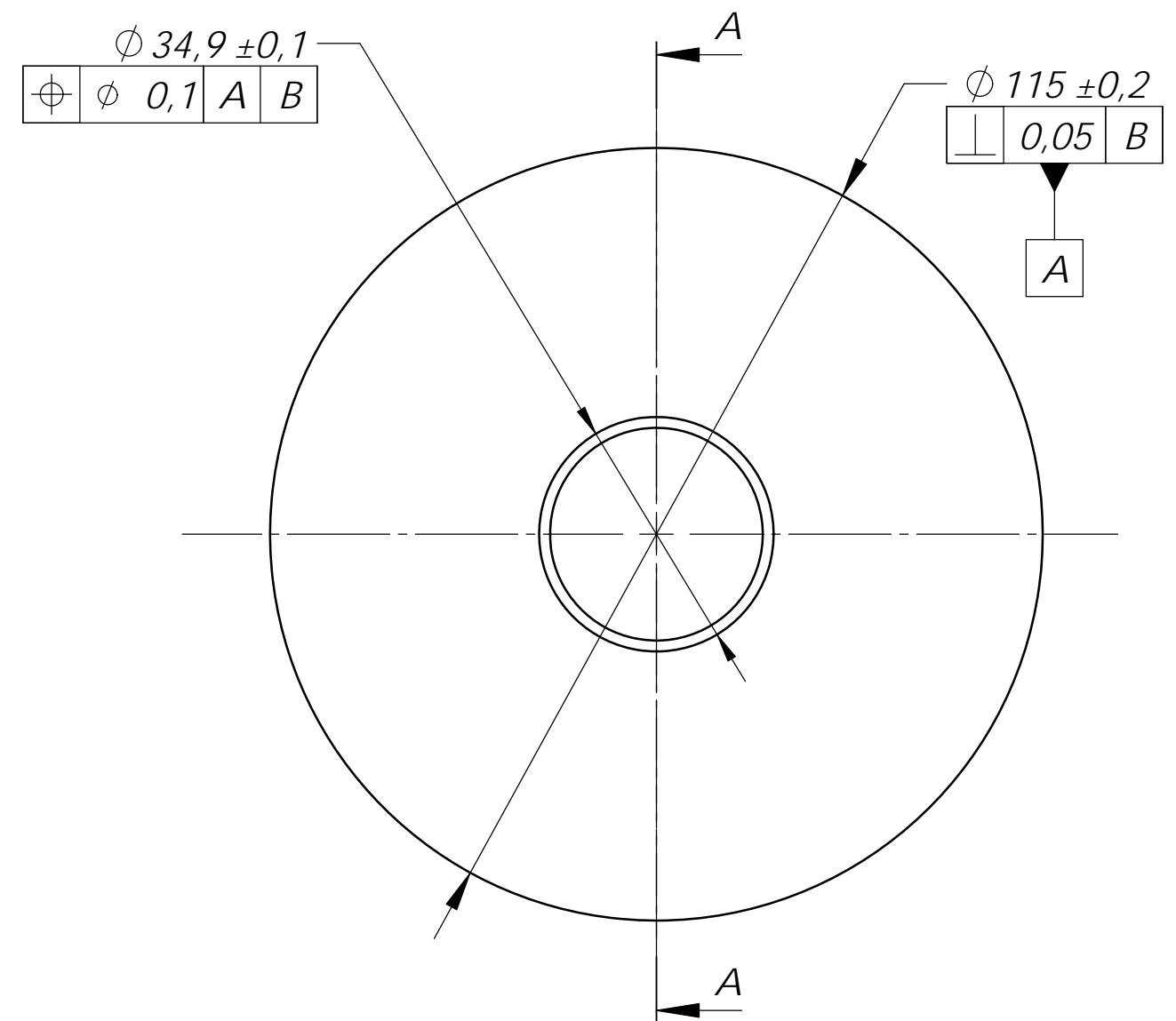
Pormenor A
Escala 5:1

Corte A-A

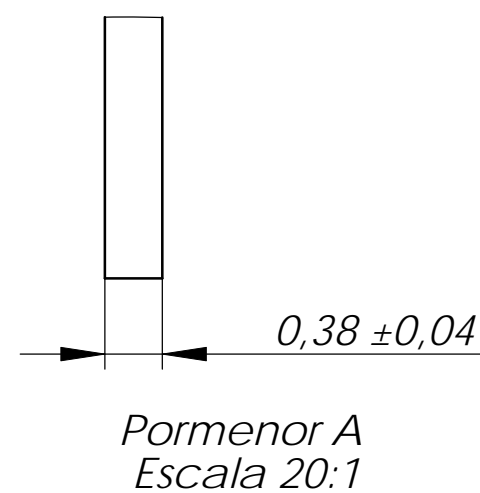
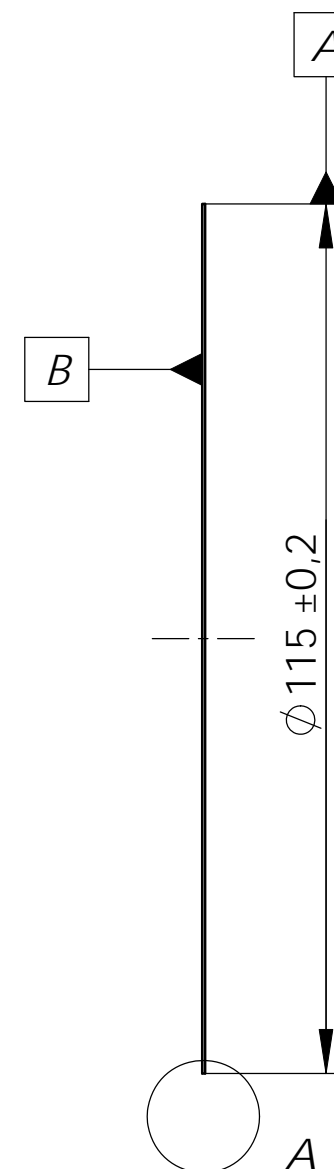
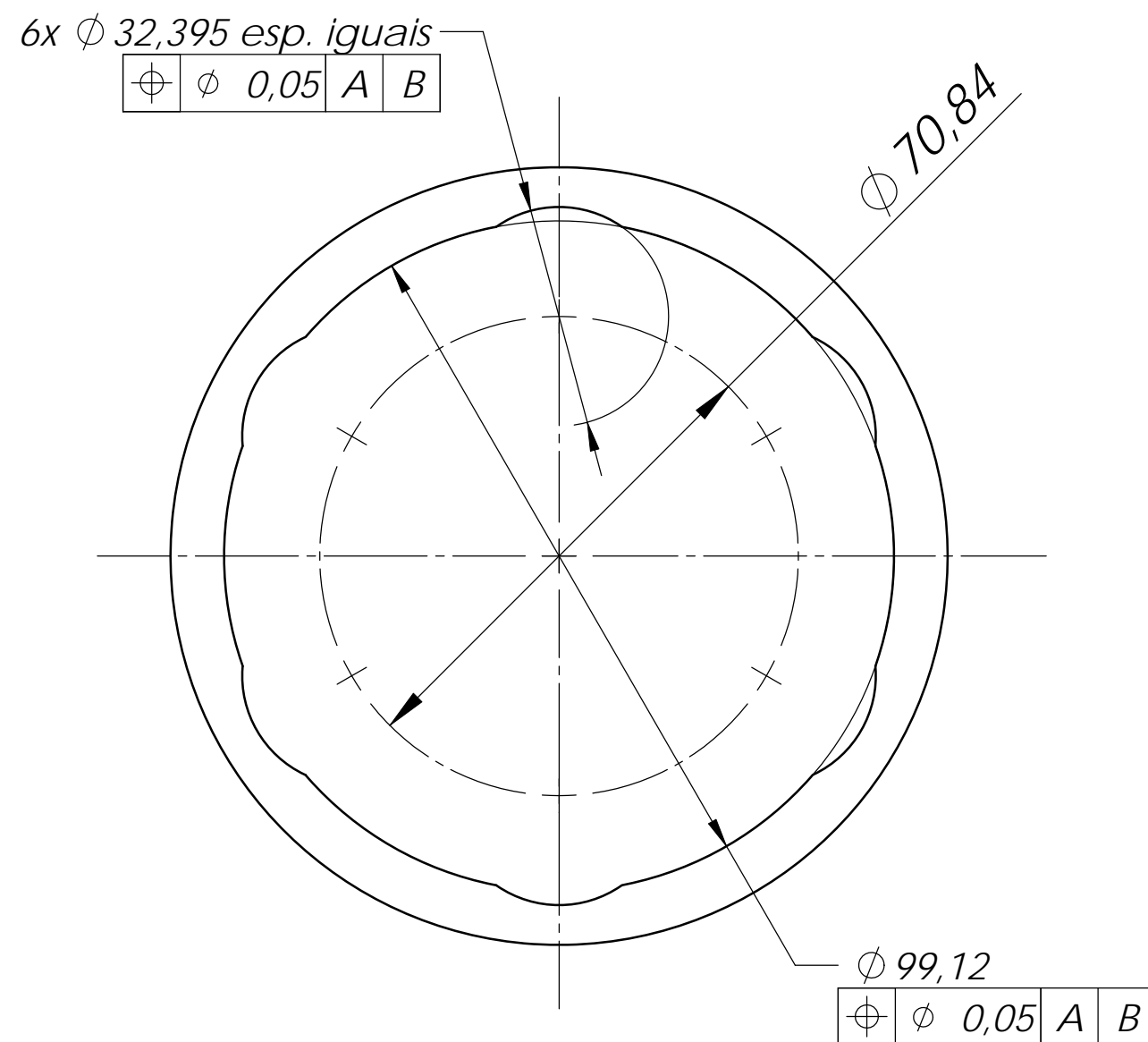
Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte	Folga obtida na montagem a medir para a selecção do calço de regulação (Desenho A. 16)	FCT/UNL				
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte						
Copiou								
Visto								
Escalas	Conjunto funcional sem o calço de regulação da folga			A.3				
1:1								
5:1								
Toleran.	-							



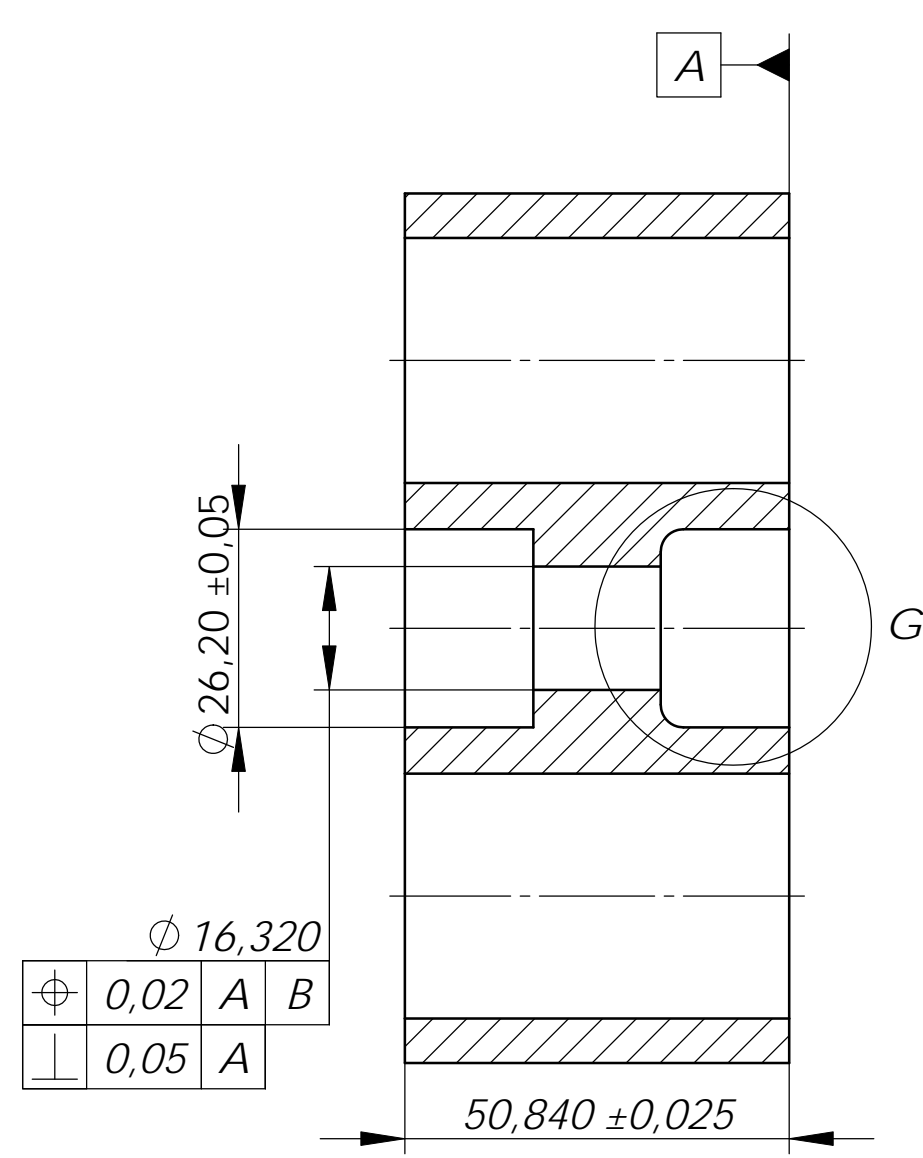
Corte A-A



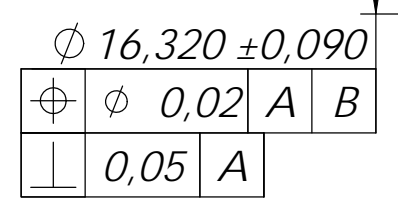
Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte	FCT/UNL	
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte		
Copiou				
Visto				
Escala	Cárter			A.4
1:1				
Toleran.				
-				



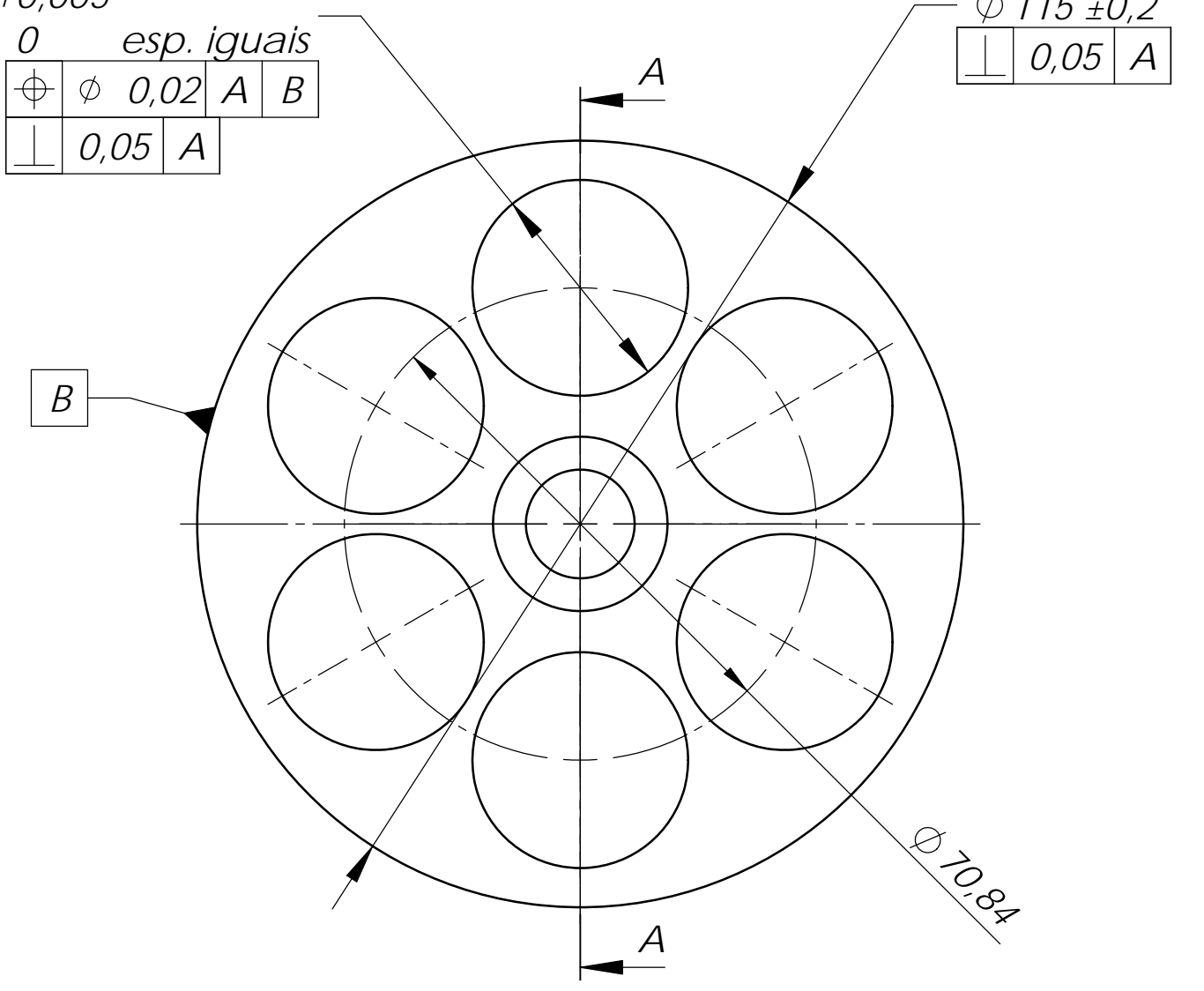
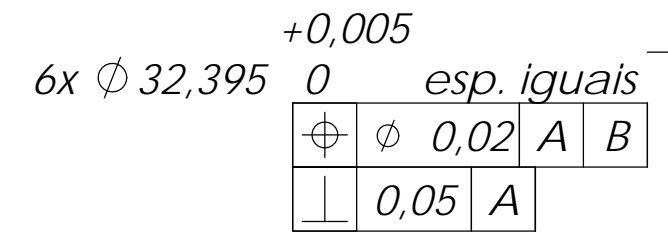
Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte	FCT/UNL	
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte		
Copiou				
Visto				
Escalas 1:1 20:1	Junta do cárter			A.5
Toleran.				
-				



Corte A-A



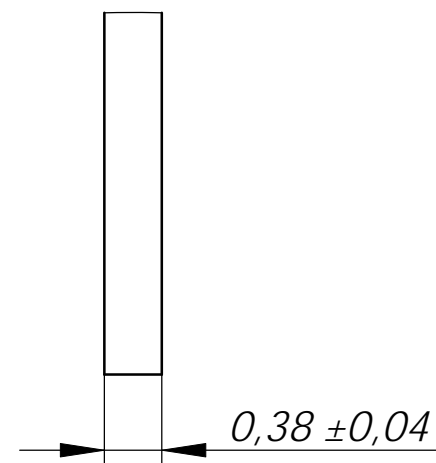
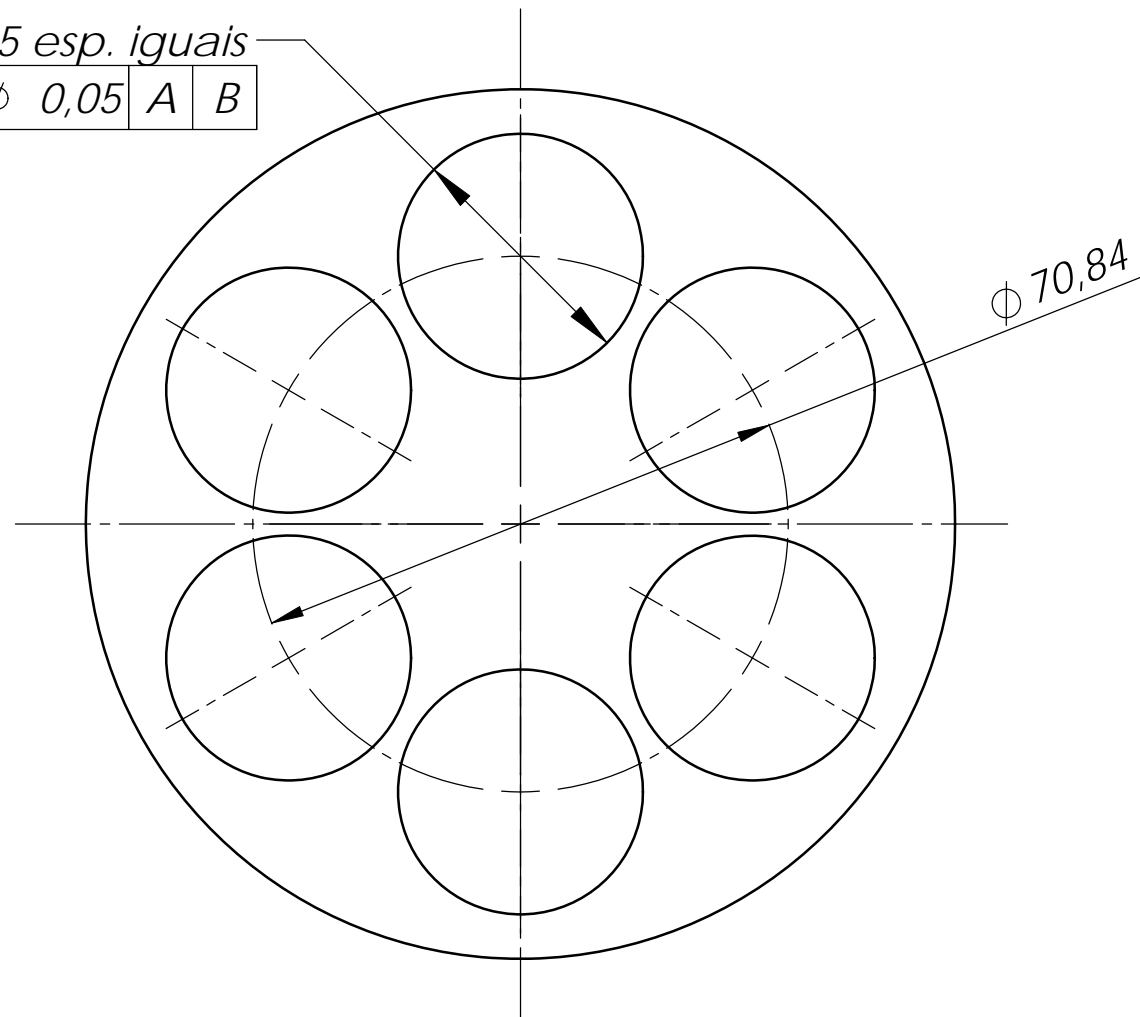
Pormenor A
Escala 2:1



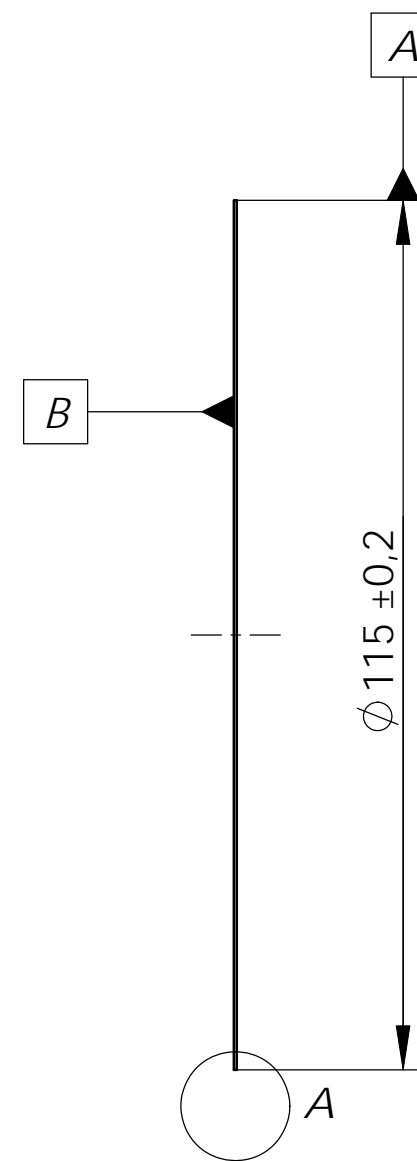
Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte	FCT/UNL	
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte		
Copiou				
Visto				
Escalas	1:1	Bloco		A.6
	2:1			
Toleran.				
-				

6x ϕ 32,395 esp. iguais

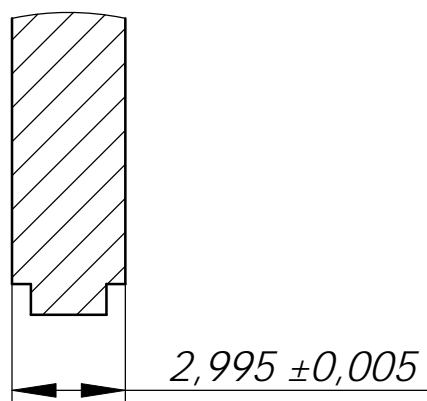
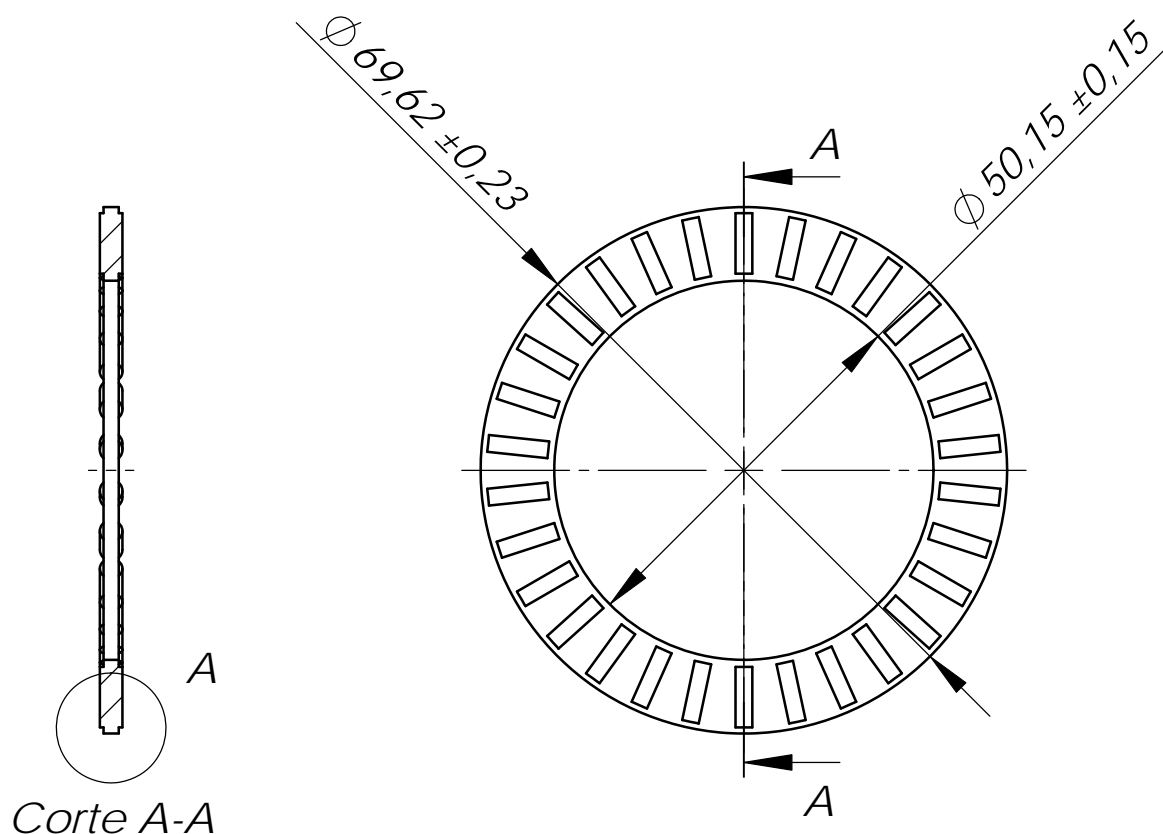
ϕ	ϕ	0,05	A	B
--------	--------	------	---	---



Pormenor A
Escala 20:1

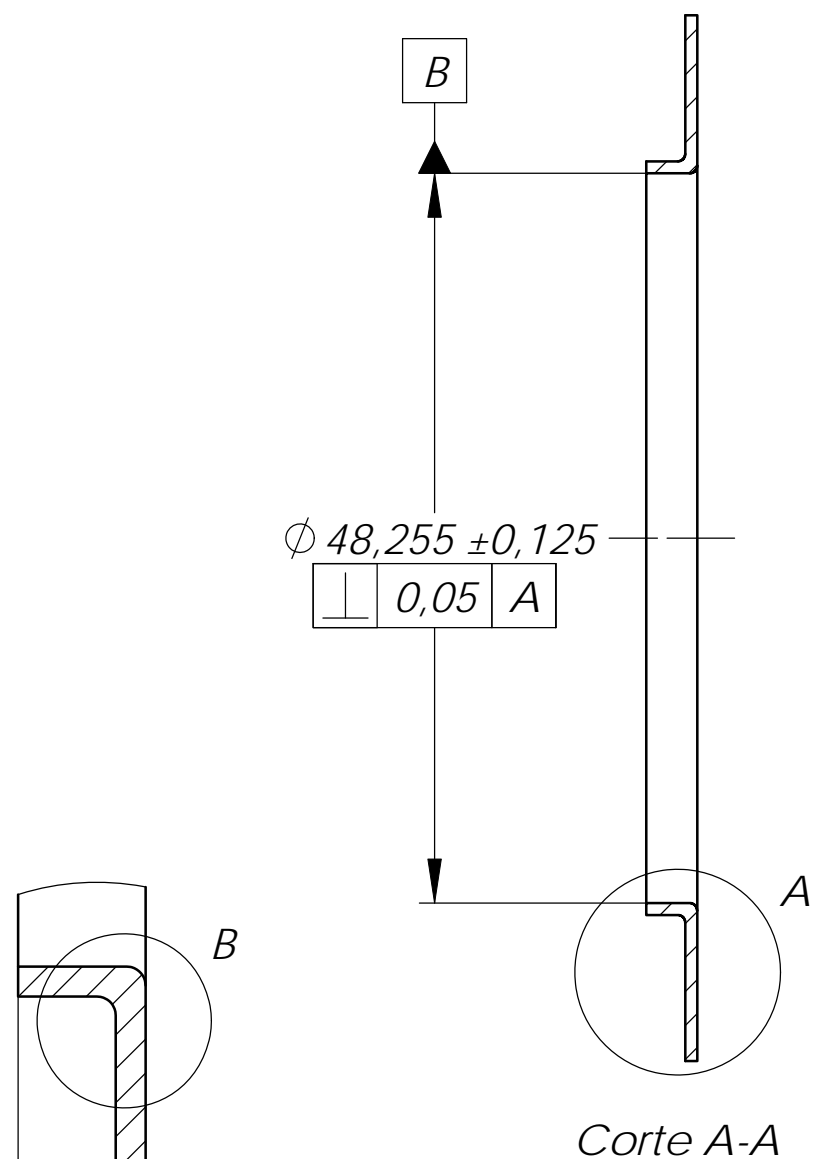


Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte	FCT/UNL	
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte		
Copiou				
Visto				
Escalas 1:1 20:1	Junta da cabeça			A.7
Toleran.				
-				



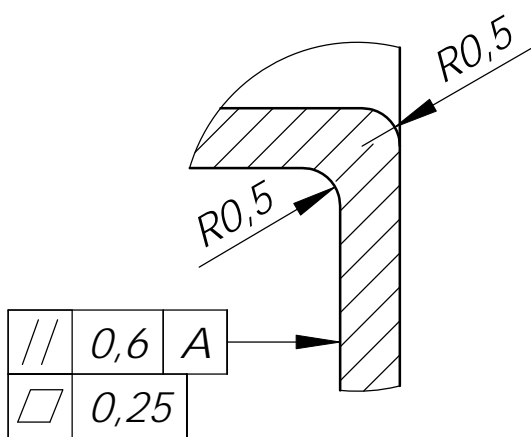
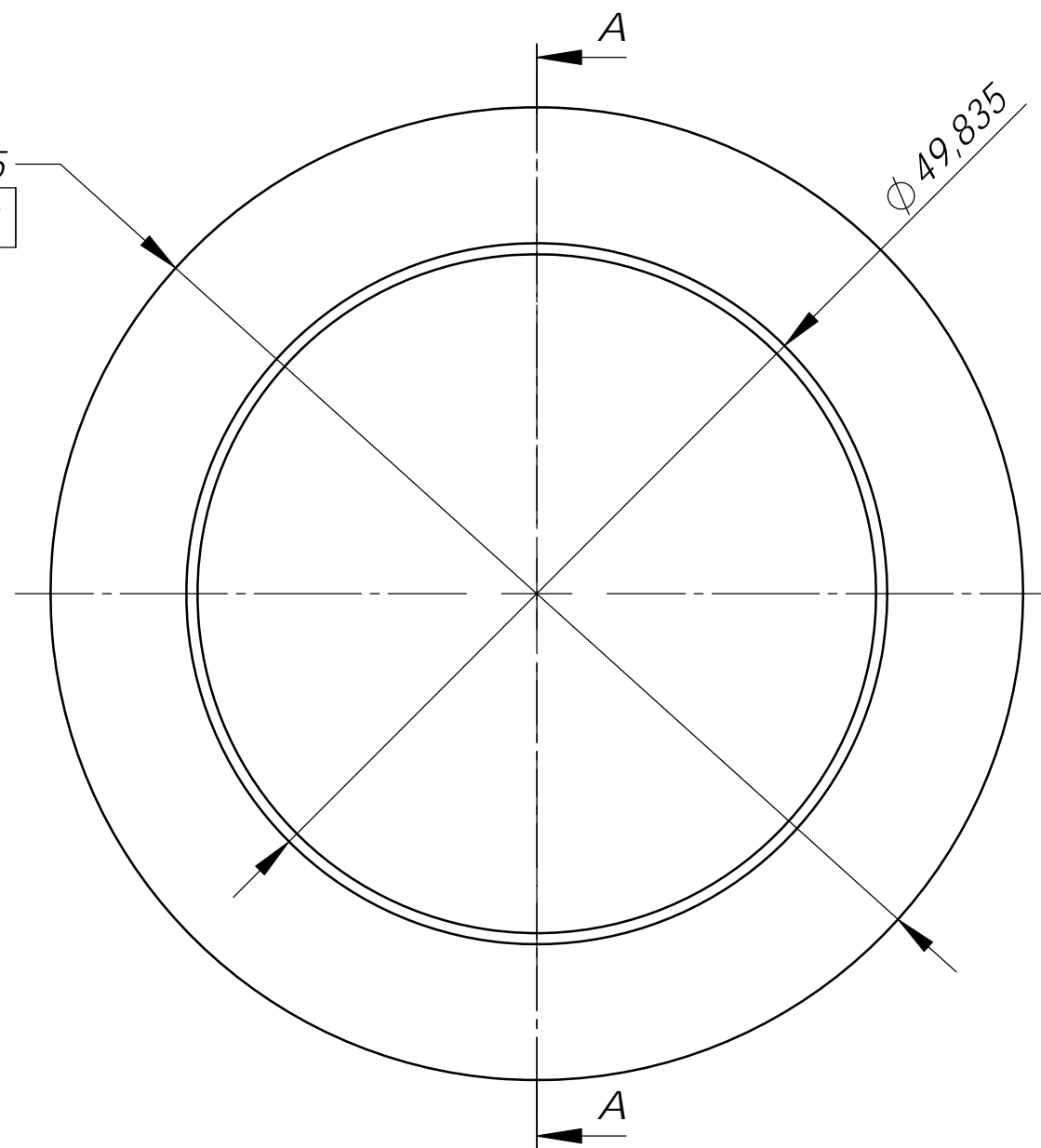
Pormenor A
Escala 5:1

Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte		FCT/UNL				
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte						
Copiou								
Visto								
Escalas 1:1 5:1	Porta rolos			A.8				
Toleran.								
-								



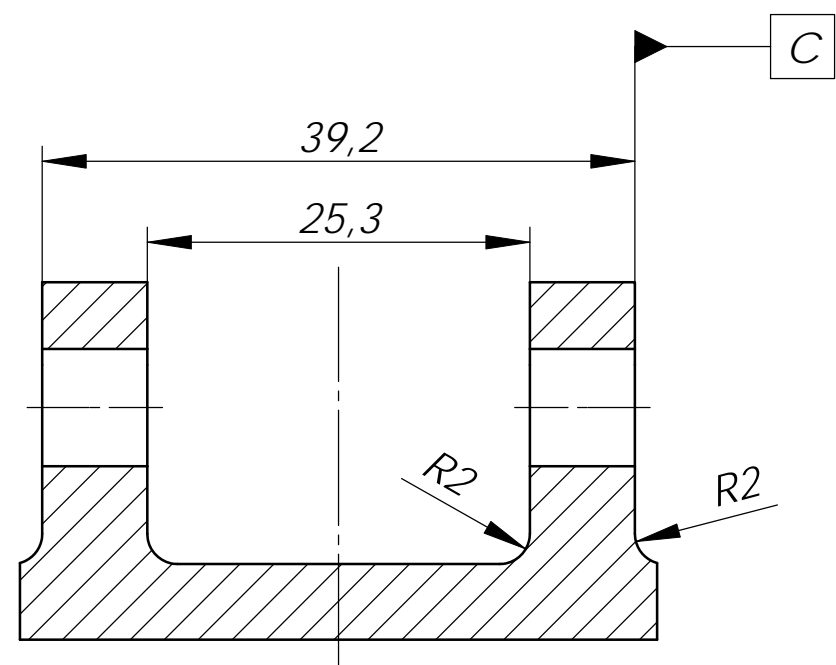
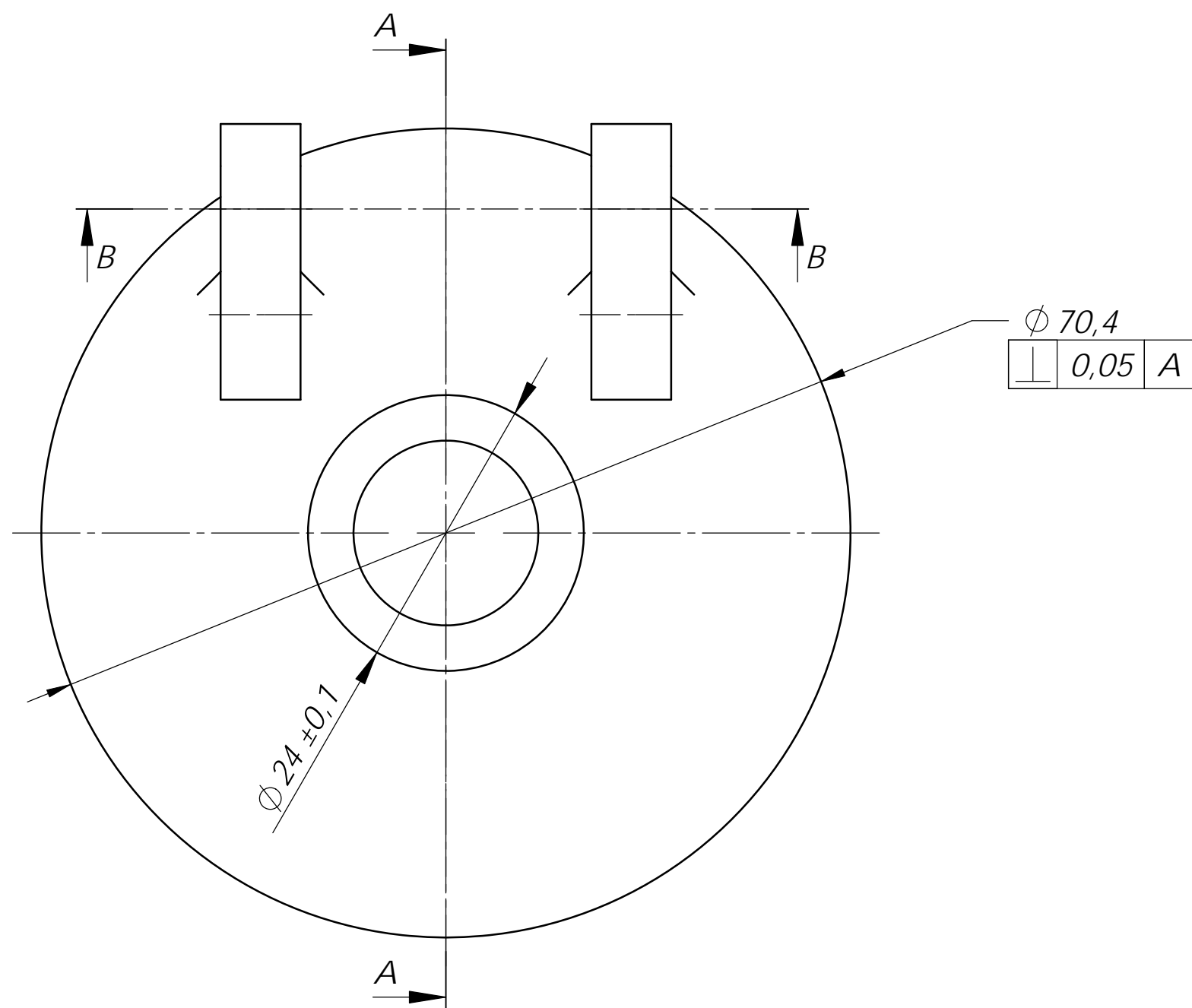
Pormenor A
Escala 5:1

$\phi 69,15 \pm 0,15$
 $\phi 0,25 \text{ (M)} \text{ A (M)} \text{ B}$

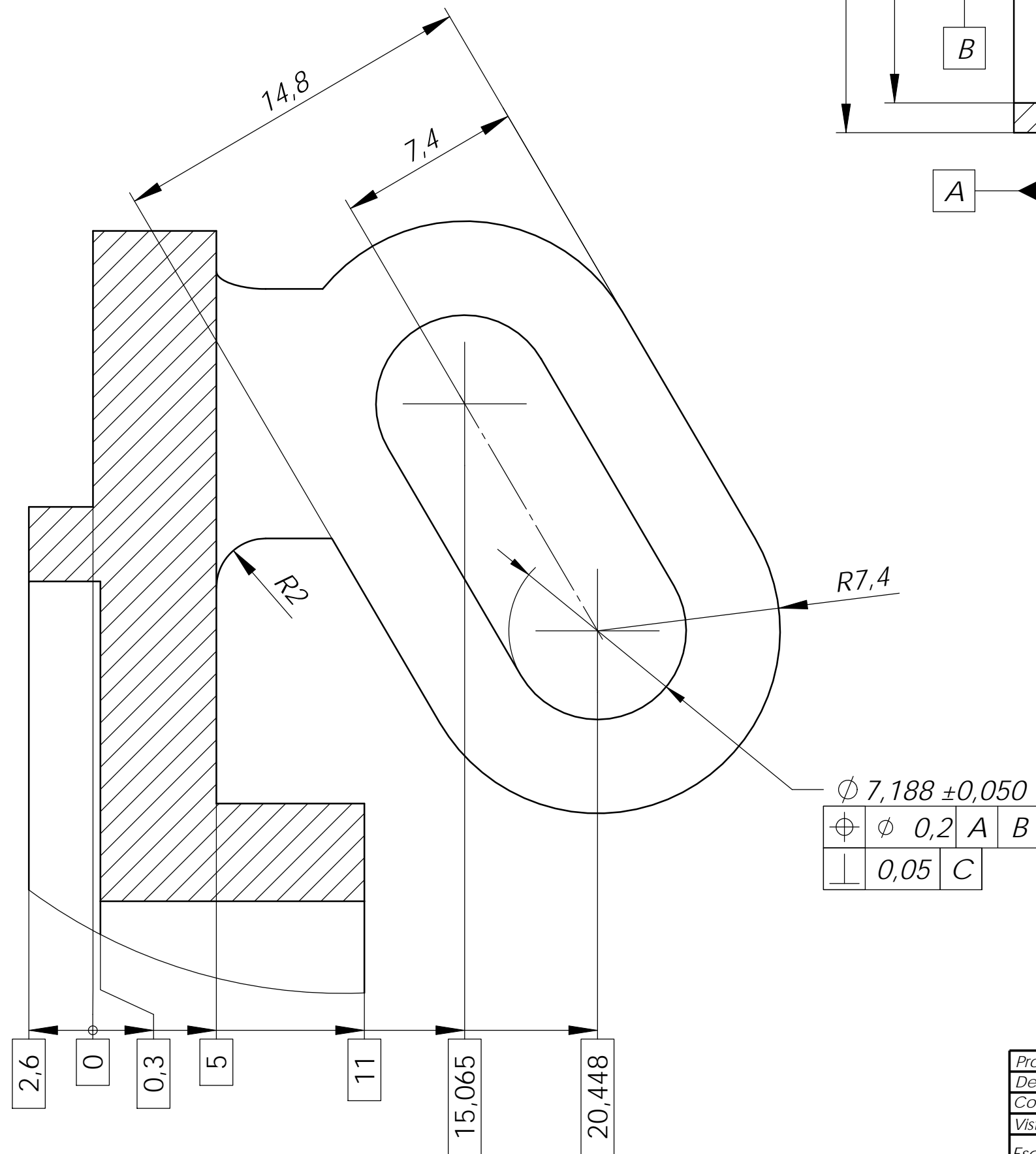


Pormenor B
Escala 10:1

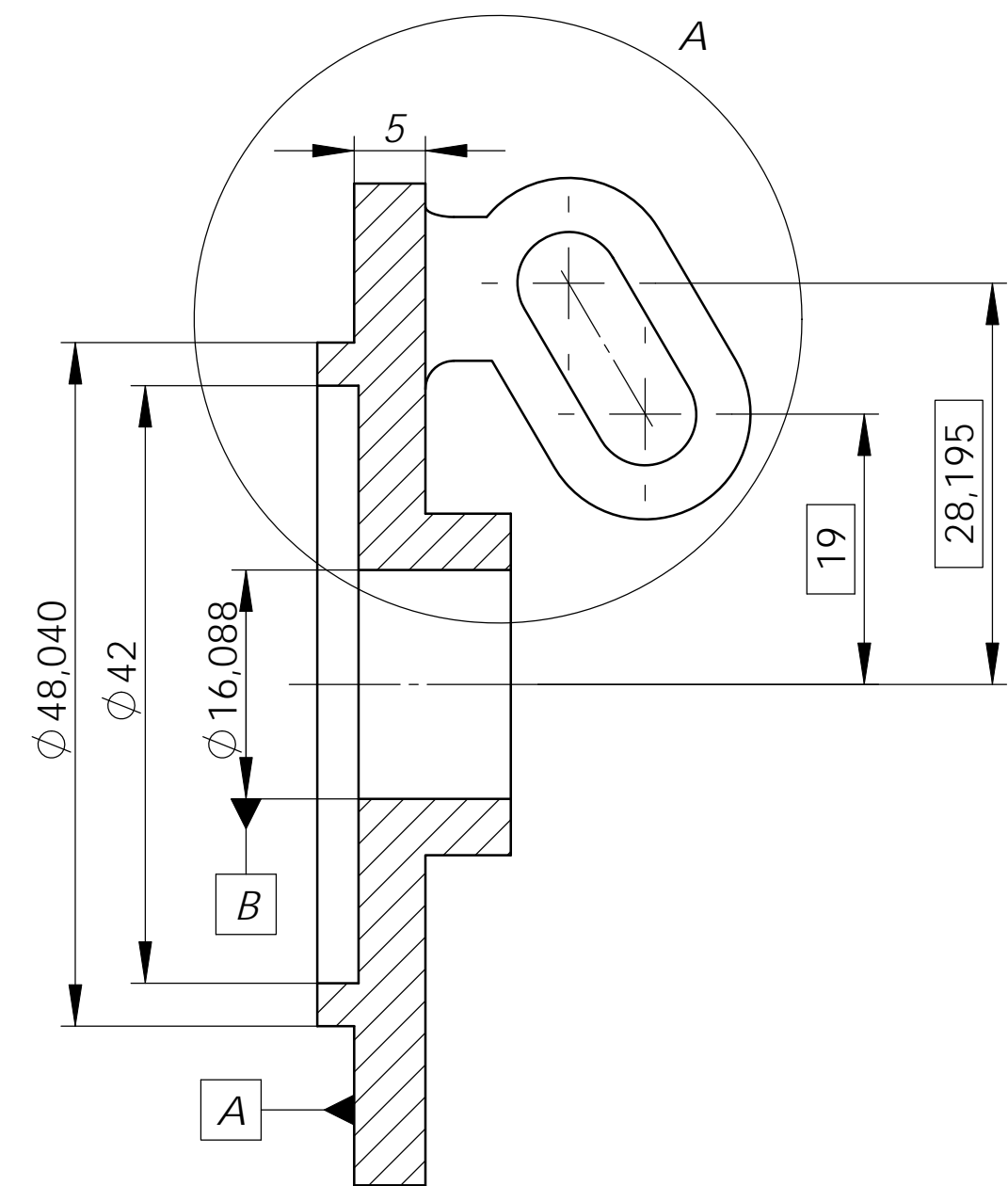
Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte	FCT/UNL	
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte		
Copiou				
Visto				
Escalas	2:1	Anel do porta rolos		A.9
	5:1			
	10:1			
Toleran.	-			



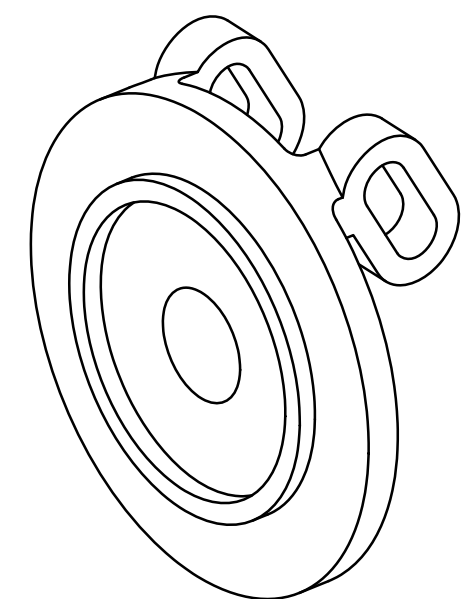
Corte B-B



Pormenor A
Escala 5:1

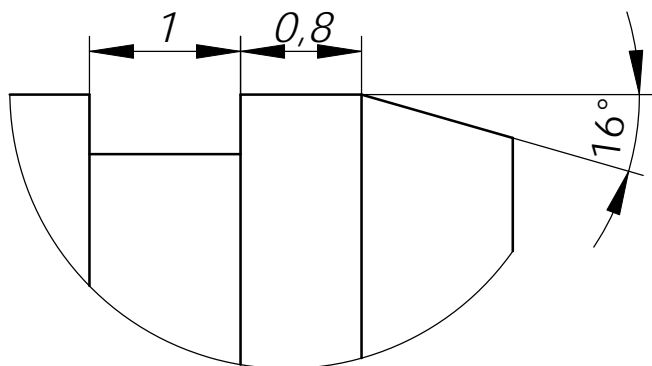
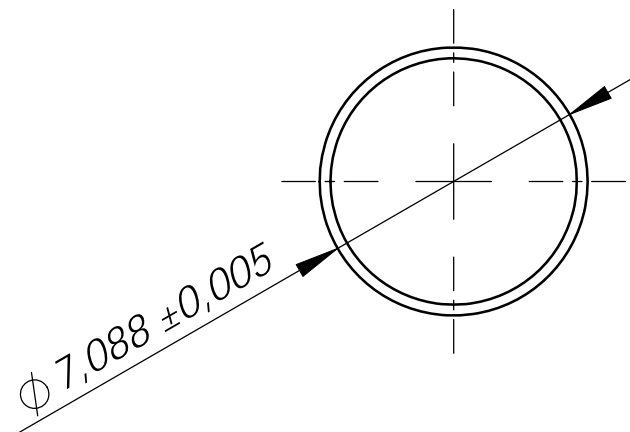
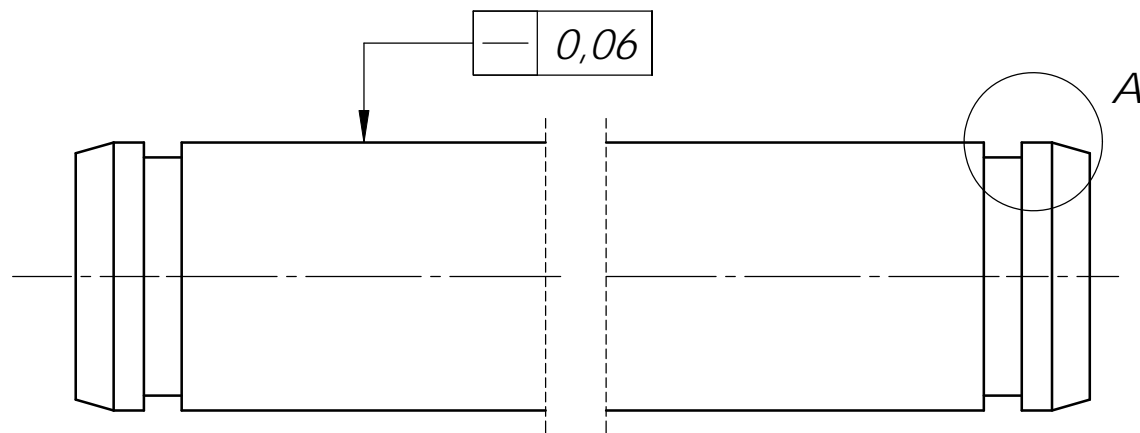


Corte A-A



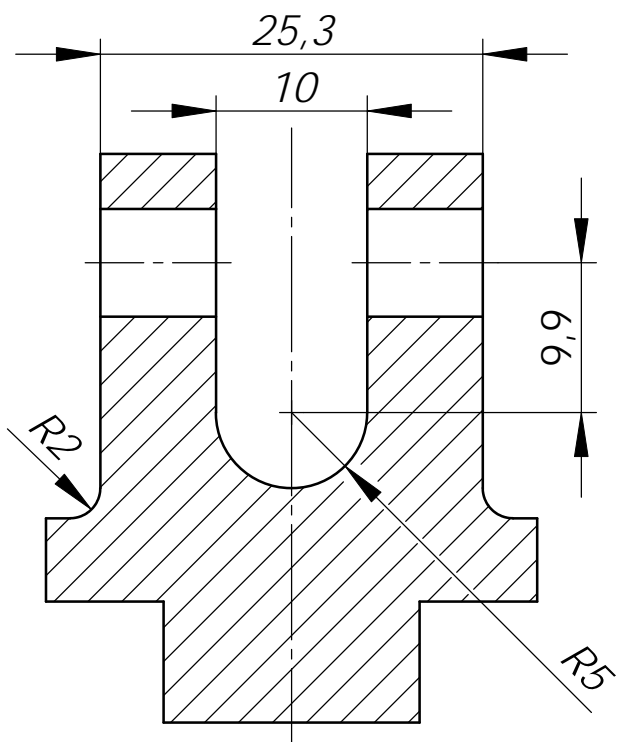
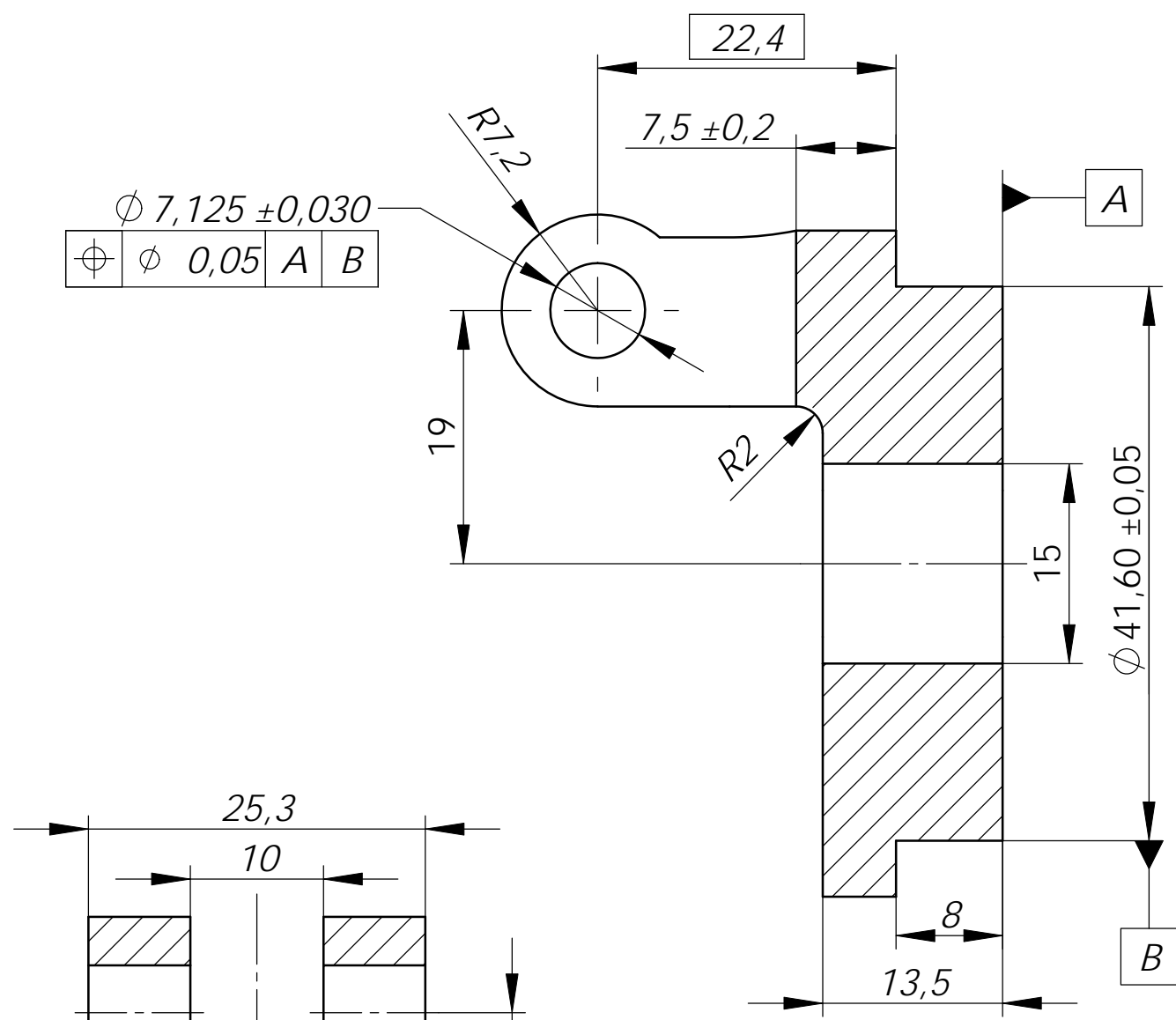
Escala 1:1

Proj.	1/12/2010	João Rui Duarte				FCT/UNL		
Des.	5/12/2010	João Rui Duarte				A.10		
Copiou								
Visto			Rotor					
Escalas	2:1							
	1:1							
	5:1							
Toleran.								
-								



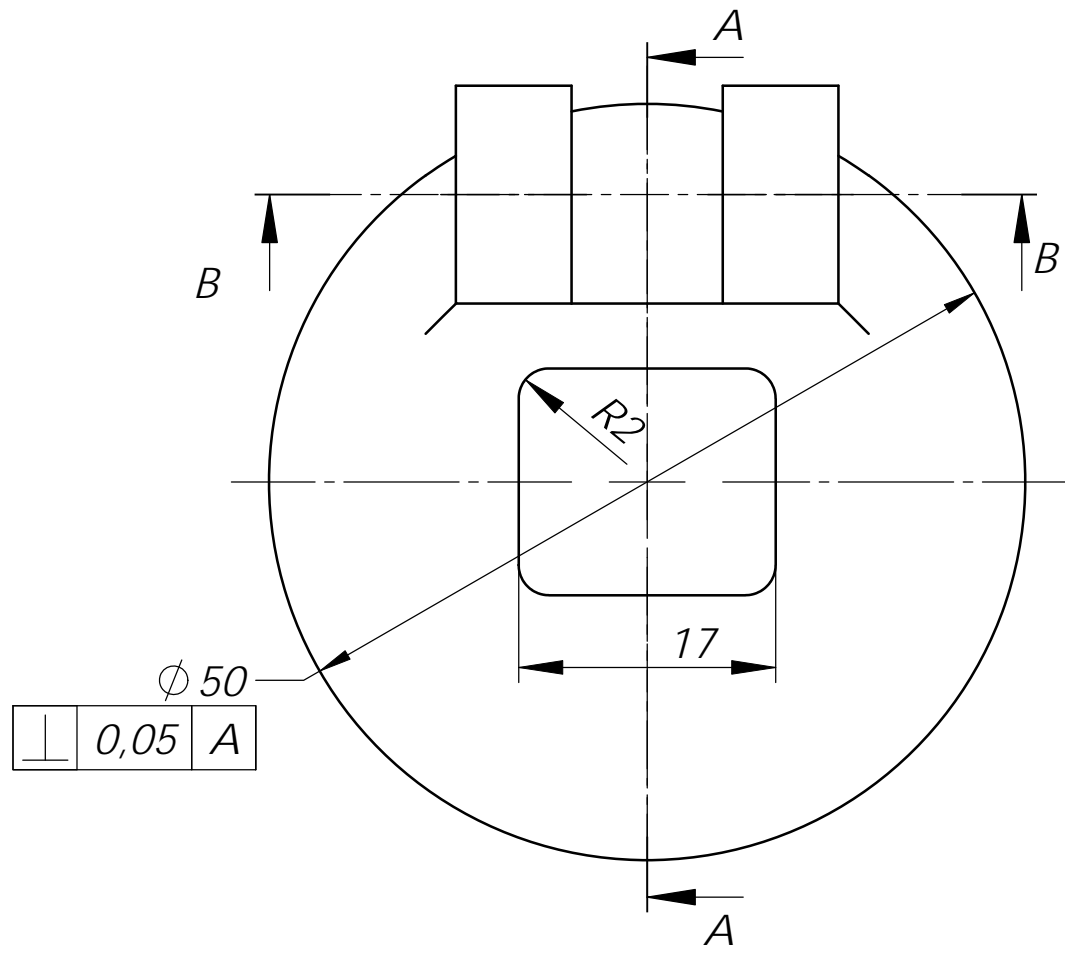
Pormenor A
Escala 20:1

Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte		FCT/UNL				
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte						
Copiou								
Visto								
Escalas 5:1 20:1	Cavilha cilíndrica			A.11				
Toleran.								
-								

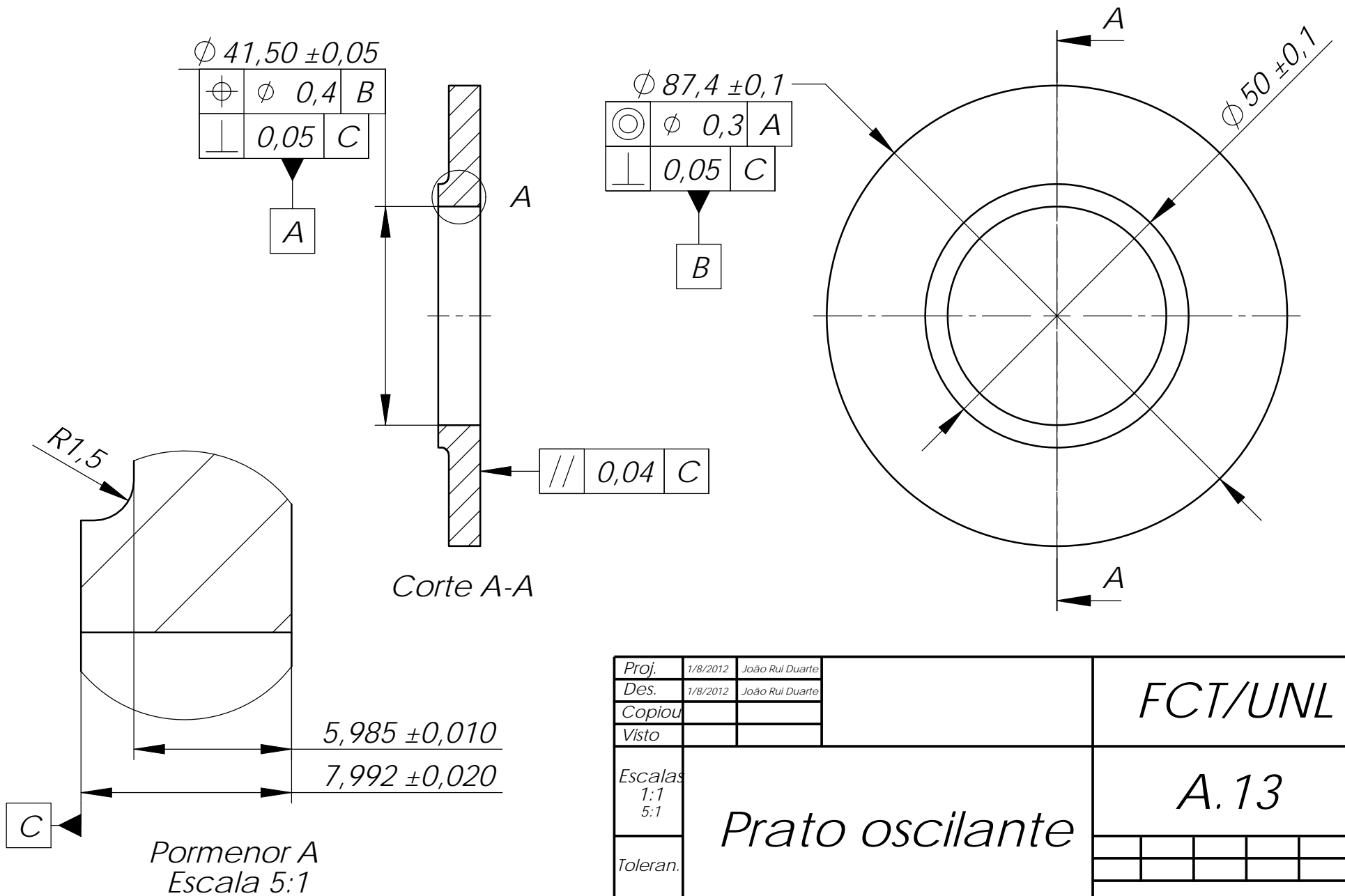


Corte B-B

Corte A-A



Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte	FCT/UNL	
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte		
Copiou				
Visto				
Escala	Cubo			A.12
2:1				
Toleran.				
-				

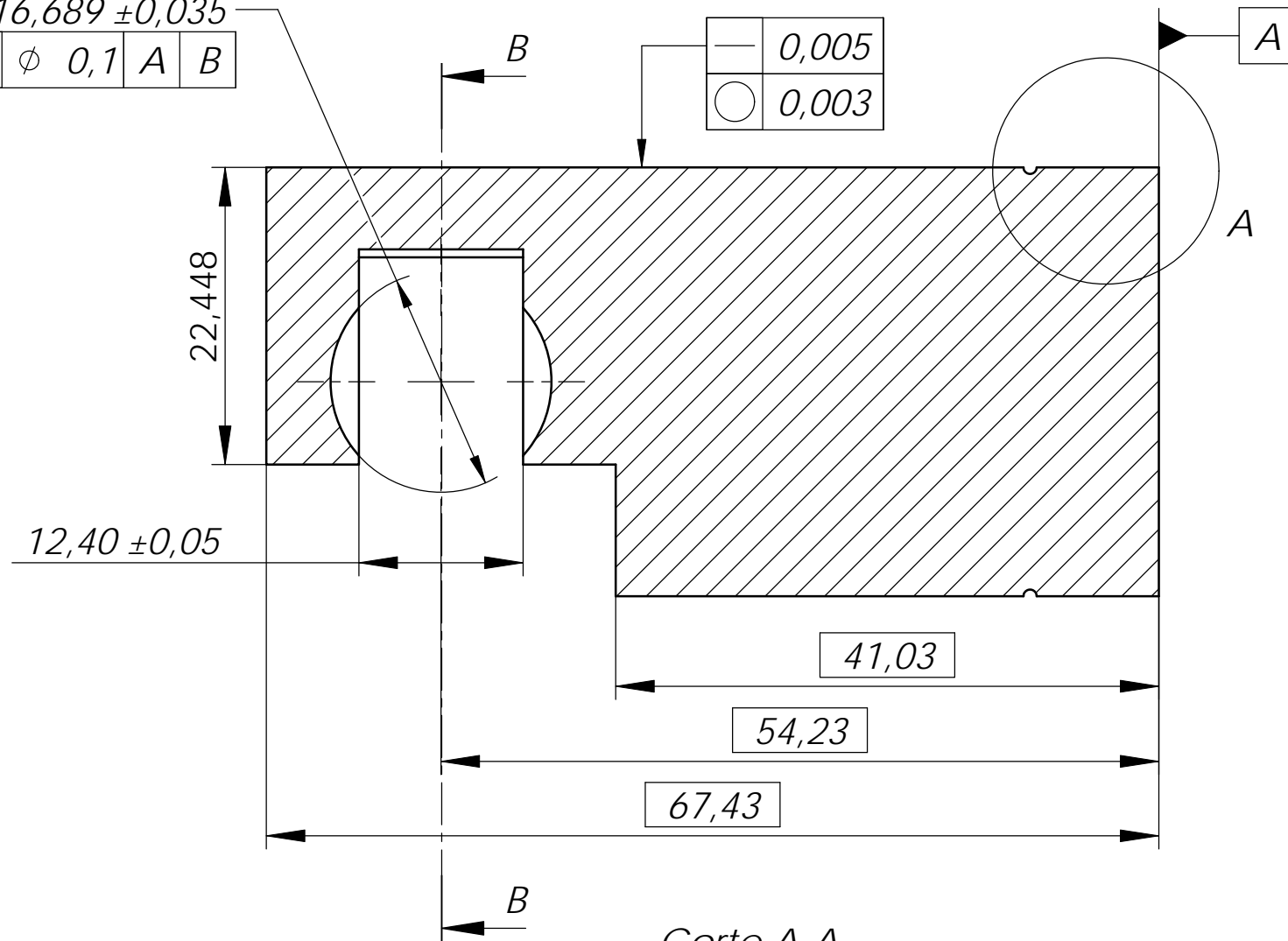


Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte	FCT/UNL			
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte				
Copiou						
Visto						
Escalas	Prato oscilante				A.13	
1:1						
5:1						
Toleran.						
-						

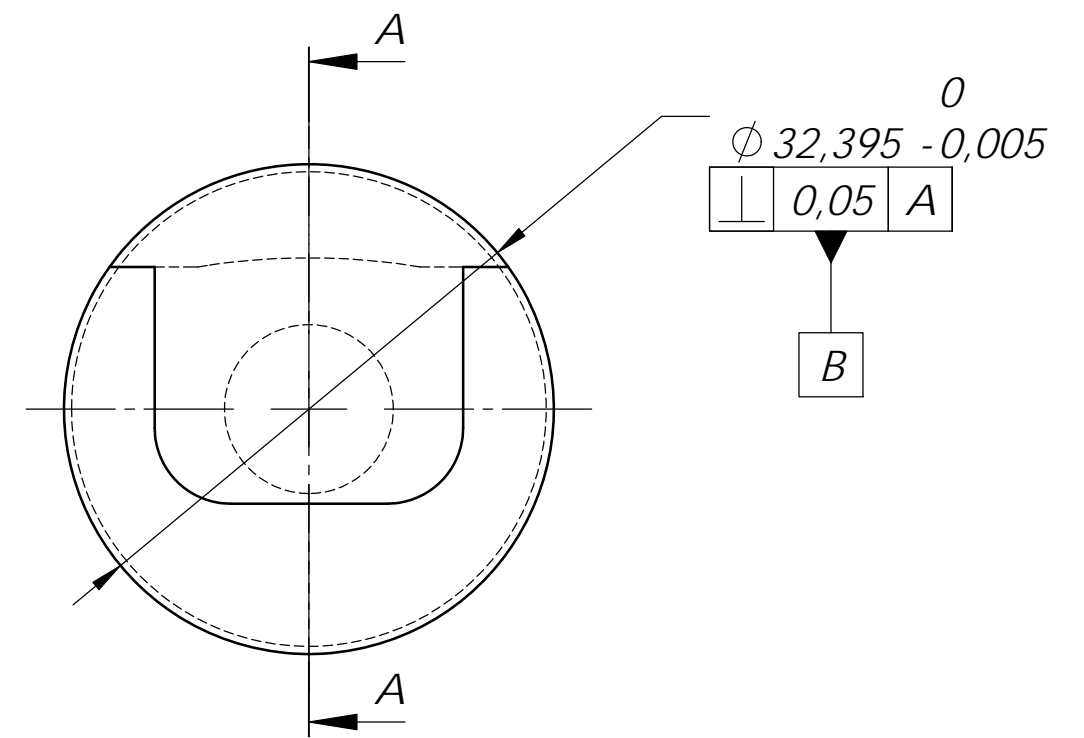
esf $\phi 16,689 \pm 0,035$

\oplus	ϕ	0,1	A	B
----------	--------	-----	---	---

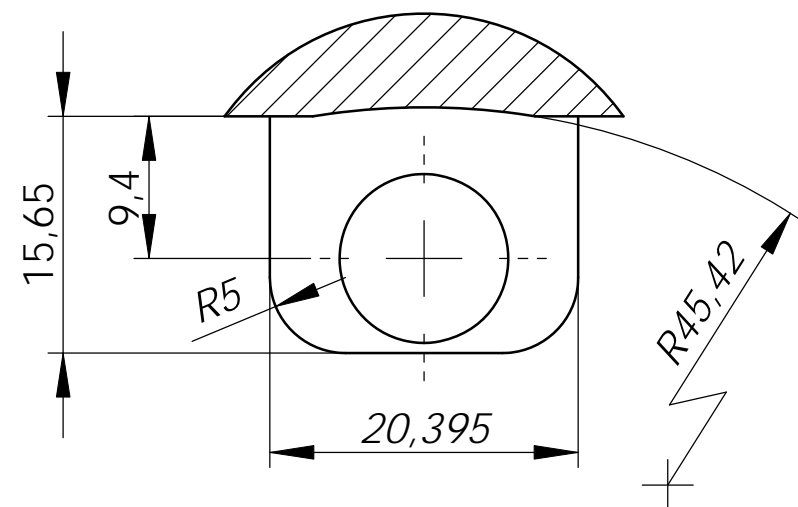
—	0,005
\bigcirc	0,003



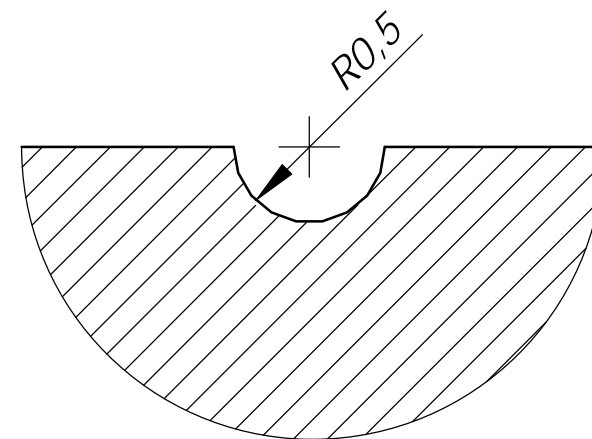
Corte A-A



Pormenor A
Escala 5:1

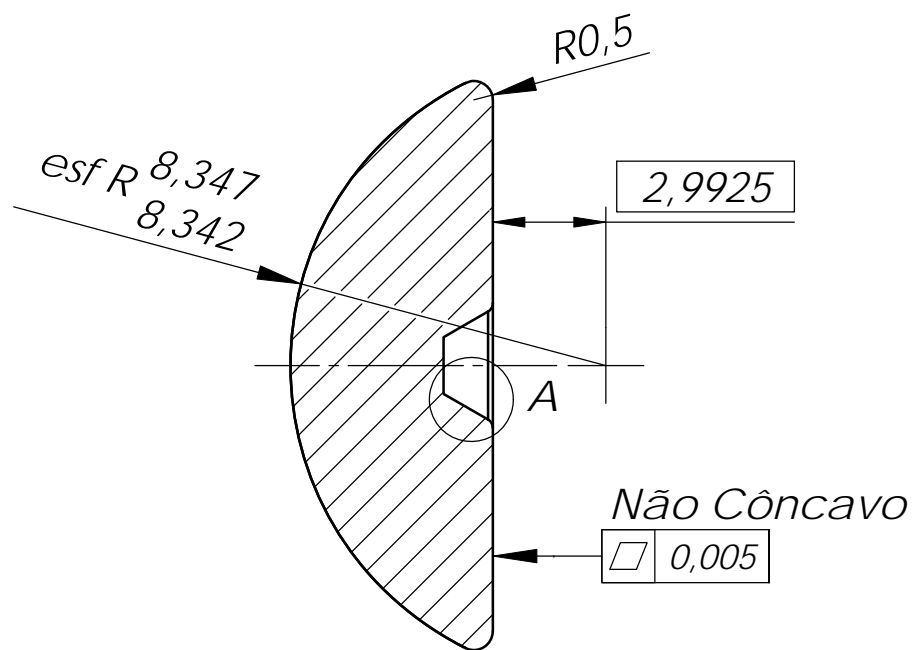


Corte B-B

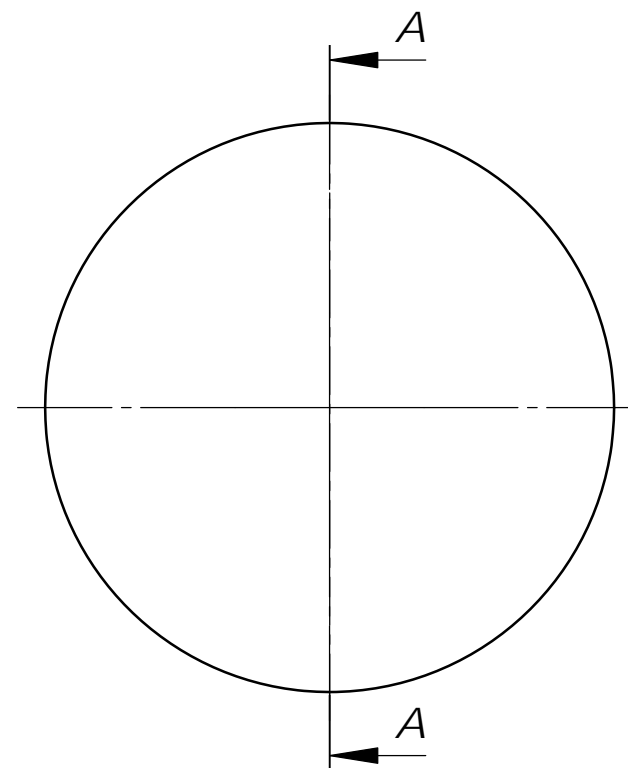
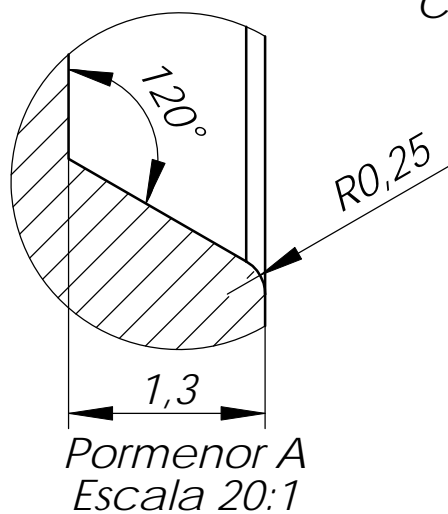


Pormenor B
Escala 20:1

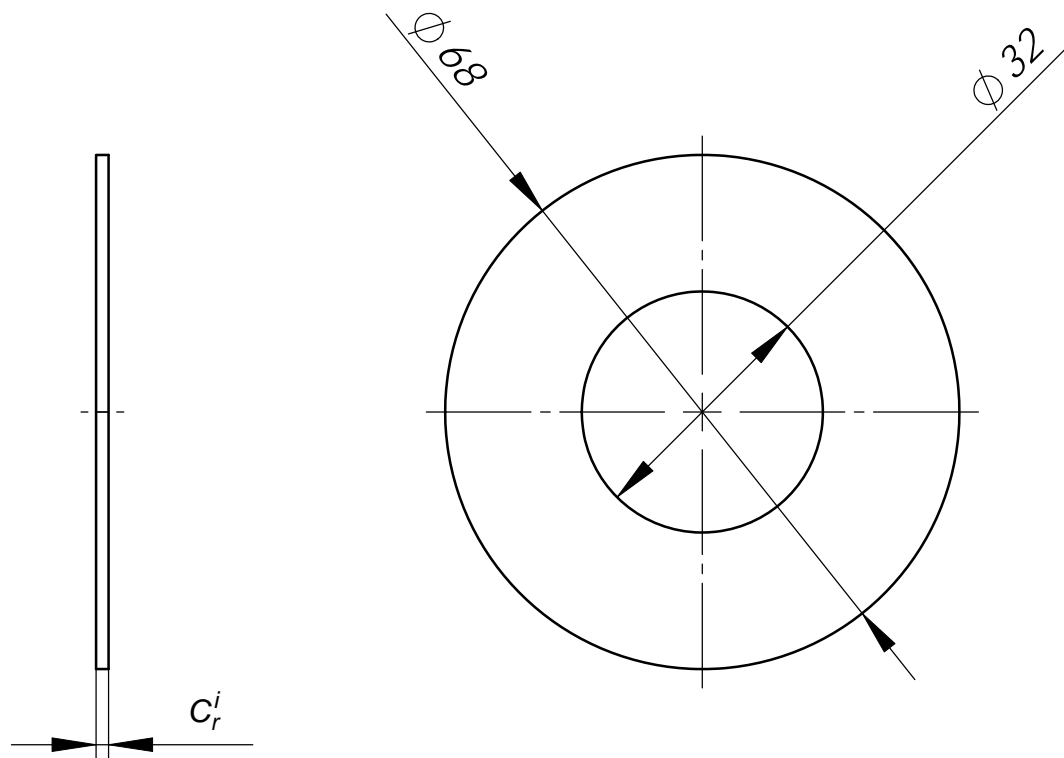
Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte	FCT/UNL	
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte		
Copiou				
Visto				
Escalas	2:1		Pistão	
	5:1			
	20:1			
Toleran.	-			
			A.14	



Corte A-A



Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte		FCT/UNL
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte		
Copiou				
Visto				
Escalas 5:1 20:1	Chaveta esférica			A.15
Toleran.				
-				



<i>Dimensão c_r^i</i>	<i>Folga medida F_{med}^i</i>
$1,294 \pm 0,035$	$[1,479 ; 1,659]$
$1,474 \pm 0,035$	$[1,659 ; 1,839]$
$1,654 \pm 0,035$	$[1,839 ; 2,019]$
$1,834 \pm 0,035$	$[2,019 ; 2,199]$
$2,014 \pm 0,035$	$[2,199 ; 2,379]$

Proj.	1/8/2012	João Rui Duarte	O calço de regulação é escolhido em função da folga medida na montagem do conjunto funcional (Desenho A.3)	FCT/UNL
Des.	1/8/2012	João Rui Duarte		
Copiou				
Visto				
Escala	Calços de regulação da folga			A.16
1:1				
Toleran.				
-				

Anexo B: Código em linguagem Matlab® da rotina de simulação numérica da amostra de valores para a folga F_{obt}

Este anexo contém o código do programa em linguagem *Matlab*® que gera a rotina de simulação de valores para a folga F_{obt} , na produção de 1000 produtos.

```
clc
clear all

lote=1000;

%15 Cotas nominais médias e suas tolerâncias
A=56.26;    tA=0.05;
B=0.38;     tB=0.08;
C=50.84;    tC=0.05;
D=0.38;     tD=0.08;
E=2.995;    tE=0.01;
F=0.79;     tF=0.06;
G1A=24.042; tG1A=0.25;
G1B=7.088;  tG1B=0.01;
G1C=25.9625; tG1C=0.08;
G2=4.9995;  tG2=0.03;
G3=54.23;   tG3=0.1;
A1=5,352;   tA1=0.005;
A2=5.985;   tA2=0.02;
A3=5,352;   tA3=0.005;
A4=16.689;  tA4=0.07;

cotas_med=[A B C D -E -F -G1A G1B -G1C -G2 -G3 A1 A2 A3 -A4];

tolerancias=[tA tB tC tD tE tF tG1A tG1B tG1C tG2 tG3 tA1 tA2 tA3 tA4];

for i=1:lote
    for j=1:15
        cota(i,j)=roundn(cotas_med(j)+tolerancias(j)*(rand-.5),-3);
    end
    fobt(i)=sum(cota(i,:));
end

Amostra = {'Dimensão da Amostra','Média','Desvio Padrão','Valor Mínimo','Valor Máximo'};
[med_fobt,dv_fobt ]= normfit(fobt);
Amostra = cat(1,Amostra,{lote,med_fobt,dv_fobt,min(fobt),max(fobt)});

%Cria o ficheiro rotina.xls que guarda os resultados
xlswrite('rotina1.xls',fobt,'Folga Obtida','A1');
xlswrite('rotina1.xls',Amostra,'Folga Obtida','C1');
```


Anexo C: Determinação da função distribuição dos valores gerados para f_{obt}

Este anexo é integralmente baseado no livro: 'Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros (Montgomery 2003)'.

A função de distribuição duma variável aleatória X , F_X , é aquela que para um dado valor x do argumento, associa a probabilidade de X assumir qualquer valor real inferior ou igual a x , ou seja:

$$F_X(x) = P(X \in]-\infty, x]) = P(X \leq x), \forall x \in \mathbb{R} \quad (C.1)$$

em que \mathbb{R} representa o conjunto de todos os números reais.

Uma variável aleatória diz-se absolutamente contínua, se sendo F_X a sua função de distribuição, existe uma função não negativa f_X , designada por função densidade de probabilidade, de modo a que se verifique:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(t) dt, \forall x \in \mathbb{R} \quad (C.2)$$

No caso da variável aleatória X seguir uma distribuição normal de parâmetros μ e σ , respectivamente, média e desvio padrão, esta escreve-se de modo abreviado $X \sim (\mu, \sigma)$, e a sua função probabilidade é:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}, \forall x \in \mathbb{R} \quad (C.3)$$

A correspondente função de distribuição é dada pelo seguinte integral:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2} dt \quad (C.4)$$

Os resultados gerados, na rotina de simulação numérica para a folga F_{obt} , levaram a considerar esta como sendo uma variável aleatória absolutamente contínua, $X=f_{obt}$, com distribuição normal de parâmetros:

$$f_{obt} \sim N(1,929; 0,095) \quad (C.5)$$

A função densidade de probabilidade para a variável aleatória f_{obt} , de acordo com a equação (C.3), vem:

$$f_{f_{obt}}(x) = \frac{1}{0,095 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-1,929}{0,095} \right)^2} \quad (C.6)$$

E a sua função distribuição é:

$$F_{f_{obt}}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{0,095 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-1,929}{0,095} \right)^2} dt \quad (C.7)$$

A função $F_{f_{obt}}(x)$, dada pela equação (C.2), permite calcular a probabilidade da folga resultante da montagem do conjunto assumir qualquer valor real dentro dum intervalo [a;b], e que atendendo à equação (C.1), esta probabilidade obtém-se pela expressão:

$$P(a \leq f_{obt} \leq b) = P(f_{obt} \leq b) - P(f_{obt} \leq a) = F_{f_{obt}}(b) - F_{f_{obt}}(a) \quad (C.8)$$